



TESIS - TE142599

**OPTIMISASI PARAMETER PSS BERBASIS MULTI  
MESIN MENGGUNAKAN *MODIFIED DIFFERENTIAL  
EVOLUTION* (MDE) PADA SISTEM JAWA BALI  
500 KV**

ROHMANITA DUANAPUTRI  
NRP. 2214201201

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



TESIS - TE142599

**OPTIMISASI PARAMETER PSS BERBASIS MULTI  
MESIN MENGGUNAKAN *MODIFIED DIFFERENTIAL  
EVOLUTION* (MDE) PADA SISTEM JAWA BALI  
500 KV**

ROHMANITA DUANAPUTRI  
NRP. 2214201201

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



THESIS - TE142599

**PARAMETERS OPTIMIZATION OF PSS BASED ON  
MULTI-MACHINE USING MODIFIED  
DIFFERENTIAL EVOLUTION (MDE) IN JAVA BALI  
500 kV SYSTEM**

ROHMANITA DUANAPUTRI  
NRP 2214201201

SUPERVISOR  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

MAGISTER PROGRAM  
POWER SYSTEM ENGINEERING  
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Rohmanita Duanaputri  
NRP. 2214201201

Tanggal Ujian : 9 Januari 2017  
Periode Wisuda : Maret 2017

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
NIP. 19640405 199002 1 001

(Pembimbing I)

2. Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.  
NIP. 19730927 199803 1 004

(Pembimbing II)

3. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
NIP. 19660318 199010 1 001

(Penguji)

4. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19800603 200604 1 003

(Penguji)

5. Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.  
NIP. 19700712 199802 1 001

(Penguji)

an. Direktur Program Pascasarjana  
Asisten Direktur

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng.  
NIP. 19611021 198603 1 001

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.  
NIP. 19601202 198701 1 001



## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**OPTIMISASI PARAMETER PSS BERBASIS MULTI MESIN MENGGUNAKAN *MODIFIED DIFFERENTIAL EVOLUTION* (MDE) PADA SISTEM JAWA BALI 500 KV**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017

Rohmanita Duanaputri

NRP. 2214201201

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **OPTIMISASI PARAMETER PSS BERBASIS MULTI MESIN MENGGUNAKAN *MODIFIED DIFFERENTIAL EVOLUTION* (MDE) PADA SISTEM JAWA BALI 500 KV**

Nama mahasiswa : Rohmanita Duanaputri  
NRP : 2214201201  
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.  
2. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

## **ABSTRAK**

Kestabilan dinamik pada sistem daya adalah sebuah permasalahan mendasar dalam pengoperasian sistem daya. Pengoperasian sistem daya yang aman menjadi perhatian utama dan beberapa penelitian terkait penggunaan *Power System Stabilizer* (PSS) untuk meningkatkan kestabilan dinamik telah banyak dilakukan. Fungsi dasar dari PSS adalah menambah redaman pada generator agar sistem menjadi lebih stabil. Parameter PSS harus diatur menggunakan teknik optimisasi data maupun *Trial-Error Method* (TEM). Metode optimisasi data yang digunakan pada penelitian ini adalah *Modified Differential Evolution* (MDE). Metode ini terbukti lebih efektif dibandingkan dengan TEM yang membutuhkan waktu yang lebih lama. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan performansi *Power System Stabilizer Modified Differential Evolution* (MDE PSS) dengan *Power System Stabilizer Particle Swarm Optimization* (PSO PSS) pada sistem multi mesin Jawa Bali 500 kV.

Kata kunci: Kestabilan, *Power System Stabilizer* (PSS), *Modified Differential Evolution*, multi mesin.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PARAMETERS OPTIMIZATION OF PSS BASED ON MULTI-MACHINE USING MODIFIED DIFFERENTIAL EVOLUTION (MDE) IN JAVA BALI 500 kV SYSTEM**

By : Rohmanita Duanaputri  
Student Identity Number : 2214201201  
Supervisor(s) : 1. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.  
2. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

## **ABSTRACT**

Power system dynamic stability is one of the essential problems for power system operation. The secure operation of power systems has become a major concern, and the applications Power System Stabilizer (PSS) for dynamic stability enhancement has been studied. The basic function of a PSS is to add damping to the generator rotor oscillations by controlling its excitation using auxiliary stability signals. PSS parameters need to be adjusted whether using a data optimization or Trial-Error Method (TEM). Data optimization method that use in this research is Modified Differential Evolution (MDE). Due to the distinctive solution of techniques of the proposed method, the time consuming TEM is no longer necessary. Performance of Power System Stabilizer Modified Differential Evolution (PSS MDE) compared with Power System Stabilizer Particle Swarm Optimization (PSS PSO) in Java Bali 500 kV multi-machine systems.

Keywords: Stability, Power System Stabilizer (PSS), Modified Differential Evolution, multi-machine.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena berkat limpahan rahmat Allah SWT semata penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul: **OPTIMISASI PARAMETER PSS BERBASIS MULTI MESIN MENGGUNAKAN *MODIFIED DIFFERENTIAL EVOLUTION* (MDE) PADA SISTEM JAWA BALI 500 KV**. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (MT) pada bidang Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam penyelesaian Tesis ini penulis banyak mendapatkan bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga tercinta di kampung halaman, khususnya kedua orang tua penulis yang selalu memberikan doa, cinta, dan dukungannya.
2. Dosen pembimbing 1, Bapak Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT., yang selalu membimbing penulis dan senantiasa memberi pencerahan, baik permasalahan tesis, maupun permasalahan klasik dalam kehidupan.
3. Dosen Pembimbing 2, Bapak Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng., yang sabar dalam membimbing penulis dalam merancang program dan penulisan buku.
4. Bapak Dosen, teman-teman S2 Sistem Tenaga, dan segenap rekan-rekan terbaik dari para asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga, yang selalu memberikan suasana kondusif dan kooperatif dalam pengerjaan Tesis .
5. Dheny Ashari, teman diskusi terbaik pada proses penyempurnaan Tesis.

Demikian besar harapan penulis agar Tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya dalam mempelajari penalaan PSS untuk meningkatkan kestabilan dinamik suatu sistem.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB 1    PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah .....	2
1.3    Tujuan.....	3
1.4    Batasan Masalah.....	3
1.5    Kontribusi.....	3
1.6    Metodologi Penelitian .....	3
1.6.1. Tahapan Permodelan Sistem.....	4
1.6.2. Pengujian Sistem.....	4
1.6.3. Tahap Optimasi Parameter Kontrol PSS.....	4
1.6.4. Tahap Analisis .....	5
BAB 2    DASAR TEORI.....	7
2.2    Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2.1    Kestabilan Steady State .....	7

2.2.2	Kestabilan <i>Transient</i> .....	7
2.2.3	Kestabilan Dinamik.....	8
2.3	Sistem Pembangkit Tenaga listrik.....	8
2.4	Mesin Sinkron Tunggal.....	9
2.5	Sistem Multi Mesin .....	12
2.6	Power System Stabilizer .....	15
2.7	Reduksi Admittansi Matrik Jaring .....	17
2.8	Differential Evolution .....	19
2.9	Modified Differential Evolution .....	22
2.10	Fungsi Objektif .....	23
BAB 3	METODA PENELITIAN .....	25
3.1	Flowchart Penyelesaian Tesis .....	25
3.2	Pengambilan Data Lapangan .....	26
3.3	Aliran Daya (Loadflow).....	31
3.4	Optimisasi Parameter PSS menggunakan MDE .....	32
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1	Hasil Optimisasi Parameter PSS .....	35
4.2	Perubahan Beban Sebesar 0.05 pu pada pembangkit Suralaya.....	36
4.2.1.	Respon Perubahan Sudut Rotot Tiap Generator .....	36
4.2.2.	Respon Perubahan Kecepatan Rotor Tiap Generator .....	44
BAB 5	PENUTUP.....	57
5.1	Kesimpulan .....	57
5.2	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....		5
NOMENCLATUR.....		61
BIODATA PENULIS .....		65

## TABLE OF CONTENT

APPROVAL SHEET .....	i
THESIS STATEMENT OF AUNTHENTICITY .....	iii
ABSTRACT (INDONESIAN) .....	v
ABSTRACT (ENGLISH) .....	vii
PREFACE .....	ix
TABLE OF CONTENT .....	xi
ILLUSTRATION .....	xiii
TABLE .....	xvi
CHAPTER 1 INTRODUCTION .....	1
1.1 Background .....	1
1.2 Problems .....	2
1.3 Goal of Thesis .....	3
1.4 Constraint .....	3
1.5 Contribution .....	3
1.6 Reasech of Method .....	3
1.6.1. System of Modeling .....	4
1.6.2. Testing System .....	4
1.6.3. Optimization Parameters PSS .....	4
1.6.4. Analysis .....	5
CHAPTER 2 THEORY .....	7
2.2 Power System Stability .....	7
2.2.1 Steady State Stability.....	7

2.2.2	Transient Stability .....	7
2.2.3	Dynamic Stability .....	8
2.3	Generating Power System .....	8
2.4	Mesin Sinkron Tunggal.....	9
2.5	Single Synchronous System .....	12
2.6	Power System Stabilizer .....	15
2.7	Reduction of Matrix Admittance .....	17
2.8	Differential Evolution .....	19
2.9	Modified Differential Evolution .....	22
2.10	Objective Function.....	23
CHAPTER 3 REASECH OF METHOD.....		25
3.1	Flowchart Completion Thesis .....	25
3.2	Field Data Collection .....	26
3.3	Loadflow .....	31
3.4	Optimization PSS Parameter With MDE.....	32
CHAPTER 4 RESULTS AND DISCUSSION .....		35
4.1	Result .....	35
4.2	Changes Expenses Amounting 0,05 pu on Suralaya Plant .....	36
4.2.1.	Every Angle Change Response Generator Rotor .....	36
4.2.2.	Response Changes Each Generator Rotor Speed .....	44
CHAPTER 5 CONCLUSION .....		57
5.1	Conclusion .....	57
5.2	Recommendation .....	57
REFERENCES .....		5
NOMENCLATUR.....		61
BIOGRAPHY .....		65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bentuk Umum Sistem Pembangkit .....	8
Gambar 2.2	Diagram Blok Generator Sinkron.....	9
Gambar 2.3	Diagram Blok Mode Mekanik Generator.....	11
Gambar 2.4	Diagram Blok Dinamika Gerak Mesin.....	12
Gambar 2.5	Diagram Blok Dinamika Gerak Mesin i dengan Interaksi Dinamik .....	13
Gambar 2.6	Blok Diagram Mesin PSS dan AVR .....	15
Gambar 2. 7	Blok Diagram PSS.....	16
Gambar 2.8	Penggambaran Jaring Sistem Tenaga Sebelum Direduksi .....	17
Gambar 2.9	Penggambaran Jaring Sistem Tenaga Setelah Direduksi .....	18
Gambar.2.10	Representasi Jaring Sistem Tenaga.....	19
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Penyelesaian Tesis .....	25
Gambar 3.2	Sistem Interkoneksi Jaring Transmisi Tegangan 500 Kv Jawa- Bali .....	26
Gambar 3.3	<i>Flowchart</i> Algoritma <i>Modified Differential Evolution</i> .....	33
Gambar 3.4	Grafik Konvergensi MDE .....	34
Gambar 4.1	Respon Sudut Rotor Pembangkit Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	38
Gambar 4.2	Respon Sudut Rotor Pembangkit Muaratawar pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	39
Gambar 4.3	Respon Sudut Rotor Pembangkit Cirata pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	40

Gambar 4.4	Respon Sudut Rotor Pembangkit Saguling pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	41
Gambar 4.5	Respon Sudut Rotor Pembangkit Tanjung Jati pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	41
Gambar 4.6	Respon Sudut Rotor Pembangkit Gresik pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	42
Gambar 4.7	Respon Sudut Rotor Pembangkit Paiton pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	42
Gambar 4.8	Respon Sudut Rotor Pembangkit Grati pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	43
Gambar 4.9	Respon Sudut Rotor Pembangkit New Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	44
Gambar 4.10	Respon Sudut Rotor Pembangkit Cilacap pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	44
Gambar 4.11	Terjadi Keseimbangan antara Pembangkitan dan Beban.....	45
Gambar 4.12	Daya Pembangkitan Lebih Besar daripada Daya Beban .....	45
Gambar 4.13	Daya Pembangkitan Lebih Kecil daripada Daya Beban .....	46
Gambar 4.14	Standar Batas Frekuensi Kerja Pembangkit ANSI/IEEE C37.106-1987.....	47
Gambar 4.15	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	48
Gambar 4.16	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Muaratawar pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	49
Gambar 4.17	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Cirata pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	50
Gambar 4.18	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Saguling pada Perubahan Beban 0,05 pu .....	50



Gambar 4.19	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Tanjung Jati pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	51
Gambar 4.20	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Gresik pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	52
Gambar 4.21	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Paiton pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	53
Gambar 4.22	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Grati pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	53
Gambar 4.23	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit New Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	54
Gambar 4.24	Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Cilacap pada Perubahan Beban 0,05 pu.....	54

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Parameter Dinamik Mesin .....	27
Tabel 3. 2	Data Saluran Transmisi .....	28
Tabel 3. 3	Data Kapasitas Generator.....	29
Tabel 3. 4	Data Beban dan Pembangkitan .....	29
Tabel 3. 5	Selisih Kapasitas dengan Pembangkitan.....	30
Tabel 3. 6	Hasil <i>Load Flow Magnitude</i> Tegangan dan Sudut.....	31
Tabel 3. 7	Data Parameter MDE .....	33
Tabel 3. 8	Batasan Parameter PSS .....	34
Tabel 3. 7	Parameter Hasil Optomisasi MDE.....	34
Tabel 4.1	Parameter PSS parameter .....	36
Tabel 4.2	Perbandingan Respon <i>Overshoot</i> Sudut Rotor .....	36
Tabel 4.3	Perbandingan Respon <i>Setling Time</i> Sudut Rotor .....	37
Tabel 4.2	Perbandingan Respon <i>Overshoot</i> Sudut Rotor .....	47
Tabel 4.3	Perbandingan Respon <i>Setling Time</i> Kecepatan Rotor.....	48

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pertambahan pelanggan listrik meningkat tajam membuat pihak penyedia jasa layanan listrik untuk menambah kapasitas pembangkit dan memperluas saluran distribusi, sehingga sistem menjadi besar. Pada sistem besar sering terjadi permasalahan-permasalahan yang berhubungan dengan kestabilan sistem, terutama masalah osilasi frekuensi rendah [1-3]. Masalah ini sudah terjadi di negara-negara maju. Sistem tenaga listrik yang beroperasi dalam keadaan stabil terdapat keseimbangan antara daya input mekanis penggerak utama (*prime mover*) dengan *output* daya listrik (beban listrik) pada sistem. Dalam keadaan ini generator berputar pada kecepatan sinkron. Setiap kenaikan atau penurunan beban harus diikuti oleh perubahan daya *input* mekanis *prime mover* generator pada sistem. Bila daya input mekanis tidak dapat menyesuaikan dengan daya beban dan rugi pada sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal. Kestabilan daya dapat diperoleh dengan menambahkan kontrol stabilitas pada sistem [4-5], seperti terjadi pada 18 Agustus 2005 di Indonesia, di mana listrik di Jakarta dan Banten mati total selama tiga jam. Selain itu, terdapat pula pemadaman di sebagian Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, dan Bali, hal ini dikarenakan sistem kekurangan pasokan akibat perubahan beban [6].

Perkembangan teknologi memunculkan solusi-solusi yang dapat dijadikan pilihan dalam menyelesaikan permasalahan kestabilan sistem tenaga listrik. Pada penelitian ini peneliti mencoba membahas tema *Power System Stabilizer* (PSS) sebagai upaya menambah redaman pada generator-generator pembangkit untuk membuat sistem menjadi lebih stabil. PSS merupakan peralatan yang sudah sering digunakan dalam mengatasi masalah kestabilan sistem tenaga listrik, yang digunakan untuk menambah redaman pada generator pembangkit [7-8]. PSS

*Conventional* (PSS C) adalah salah satu jenis PSS yang paling sering dijumpai dan sudah diaplikasikan pada sistem single mesin maupun multi mesin [9].

Perkembangan sistem tenaga listrik yang cepat, disertai perubahan beban yang semakin acak menimbulkan berbagai permasalahan baru yang harus direspon dengan cepat dan tepat hal ini memicu penerapan *Artificial Intelligent* (AI) sebagai alat untuk pengoptimalan parameter pada PSS, sehingga berkembang PSS berbasis AI, yaitu *Fuzzy Logic*, *Genetic Algoritm*, *Particle Swarm Optimization*, maupun *Neural Network* [10]. Aplikasi PSS berbasis AI sebagian besar membutuhkan pelatihan (*training*), karena sistem berkembang maka data juga menjadi besar hal ini menimbulkan permasalahan dalam proses learning terutama yang berkaitan dengan jumlah data dan waktu untuk learning, sehingga dikembangkan metode *Modified Differential Evolution Algorithm* (MDE) untuk mempercepat proses learning dan meminimalkan jumlah data yang dibutuhkan dalam proses learning [11-12].

Perkembangan sistem tenaga listrik yang semakin cepat dan masalah yang semakin beragam, menuntut penyelesaian yang real time, sehingga penulis mencoba mengajukan usulan untuk mengembangkan desain PSS untuk dapat merespon perubahan performa sistem secara langsung berdasar pada MDE atau disebut PSS MDE. Pada penelitian ini PSS MDE diaplikasikan (disimulasikan dengan *software* MATLAB) pada sistem multi mesin Jawa Bali 500 kV. Pengaplikasian PSS MDE pada sistem Jawa Bali 500 kV dititikberatkan pada kinerja PSS MDE terhadap osilasi frekuensi rendah perbaikan performansi sistem.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara memodelkan pada sistem Jawa-Bali 500 kV ke dalam simulasi (SIMULINK-MATLAB)?
2. Bagaimana cara mengaplikasikan PSS pada sistem Jawa-Bali 500 kV yang dioptimisasi menggunakan MDE?
3. Bagaimana performansi sistem Jawa-Bali 500 kV setelah dipasang PSS?

### 1.3 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat memodelkan pada sistem Jawa-Bali 500 kV ke dalam simulasi (SIMULINK-MATLAB).
2. Dapat mengaplikasikan PSS pada sistem Jawa-Bali 500 kV yang dioptimisasi menggunakan MDE.
3. Dapat memperoleh performansi sistem Jawa-Bali 500 kV setelah dipasang PSS.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Simulasi penelitian ini hanya dilakukan pada sistem Jawa Bali 500 kV dan dilakukan secara *off-line* dengan SIMULINK MATLAB.
2. Analisa dilakukan pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV.
3. *Controller* yang digunakan adalah PSS yang dipasang di generator Suralaya.
4. Metode yang digunakan untuk mengoptimisasi nilai PSS adalah MDE.
5. Beban pada sistem dianggap statis.
6. Faktor harmonisa diabaikan.
7. Faktor ekonomis tidak diperhitungkan

### 1.5 Kontribusi

Pada penelitian sebelumnya proses training dilakukan dengan *Fuzzy Logic*, *Genetic Algorithm*, maupun *Neural Network*, pada penelitian ini proses *training* akan dilakukan dengan algoritma MDE, yang dapat mempercepat proses *learning*. Selain itu data yang digunakan adalah data terbaru untuk jaringan Jawa Bali 500 kV.

### 1.6 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan pada Tesis ini terbagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap permodelan sistem, tahap pengujian sistem, dan tahap analisis. Adapun keterangan mengenai masing-masing tahapan yang dilakukan dalam Tesis ini adalah sebagai berikut:

### 1.6.1 Tahapan Permodelan Sistem

Adapun langkah-langkah pada tahap permodelan sistem antara lain:

#### a. Reduksi Admittansi Matriks Jaring

Tahap ini dilakukan untuk mereduksi admittansi matriks jaring. Reduksi matrik admittansi jaring ini dimaksudkan untuk mereduksi matrik admittansi jaring  $Y_{BUS}$  menjadi matrik admittansi jaring reduksi  $Y_{RED}$  dengan mereduksi bus-bus non generator, sehingga yang awalnya sistem memiliki 29 bus direduksi menjadi 10 bus, yakni yang tersisa adalah bus generator saja

#### b. Permodelan Sistem Multi Mesin

Pada tahap ini, akan dilakukan permodelan Sistem Multi Mesin dengan menggunakan MATLAB Simulink.

#### c. Permodelan Kontrol PSS

Pada tahap ini, dibuat model generator dan sistem eksitasi yang sama untuk sistem multi mesin, namun dengan tambahan model kontrol PSS. Kontrol PSS yang dipilih adalah permodelan kontrol PSS dengan enam variabel sebagai objek optimasi metode MDE, yakni:

1. Komponen *gain* ( $K_{pss}$ )
2. Komponen *wash out* ( $T_w$ )
3. Komponen *lead-leg* yang terdiri dari 4 komponen, yakni  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , dan  $T_4$

### 1.6.2 Pengujian Sistem

Pada tahap ini, dilakukan penambahan kontrol PSS pada permodelan sistem.

### 1.6.3 Tahap Optimasi Parameter Kontrol PSS

Setelah melakukan reduksi jaring, sistem dimodelkan (generator dan eksitasi), dan kontrol PSS, akan dilakukan *tunning* PSS dengan metode MDE untuk mendapatkan *overshoot* dan *settling time* yang baik pada respon Kecepatan rotor (frekuensi) dan sudut rotornya. Fungsi objektif yang digunakan pada MDE adalah *Comprehensive Damping Index* (CDI).



#### **1.6.4 Tahap Analisis**

Simulasi dilakukan pada sistem yang tidak menggunakan PSS dan sistem menggunakan PSS yang telah dioptimalkan penalaannya pada masing-masing kasus. Hasil simulasi dilakukan dengan menganalisis data dengan membandingkan hasil simulasi sistem. Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran dan pendiskripsian kesimpulan dari Tesis. Kesimpulan kemudian disajikan dalam bentuk hasil analisis dan perbandingan. Selain itu saran untuk keberlanjutan penelitian akan diberikan.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik**

Kestabilan sistem tenaga listrik diartikan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan jika terjadi gangguan. Sistem tenaga listrik yang stabil terdapat keseimbangan antara daya masukan mekanis (*prime mover*) dengan daya keluaran elektrik. Dalam keadaan ini generator berputar pada kecepatan sinkron. Kenaikan atau penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya input mekanis dari *prime mover*. Apabila perubahan ini tidak diikuti oleh perubahan daya mekanis dalam menyesuaikan beban dan rugi sistem, maka akan terjadi ketidakstabilan. Kestabilan sistem tenaga dapat dibedakan menjadi tiga kondisi, yaitu kestabilan *steady-state*, *transient* dan dinamik [13].

##### **2.2.1 Kestabilan *Steady State***

Kestabilan *steady state* atau *small signal stability* yaitu kemampuan sistem untuk mencapai kondisi stabil yang baru setelah terjadi gangguan. Daya listrik yang dibangkitkan generator harus seimbang dengan daya mekanis yang dihasilkan oleh turbin. Kestabilan ini ditandai dengan perubahan beban yang kecil, pengaturan yang kontinyu, dan pengaturan diskrit yang diberikan secara langsung.

##### **2.2.2 Kestabilan *Transient***

Stabilitas peralihan (*transient*) didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi transfer daya setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama beberapa saat yang menyebabkan penurunan nilai tegangan terminal secara signifikan. Gangguan besar ini misalnya putus jaring, beban lepas, dan pengaturan *tap changer* sebelum *governor* bekerja. *Governor* adalah pengendali kecepatan rotor berdasarkan inputan dari terminal keluaran generator. Gejala *transient* ini dikenali dengan

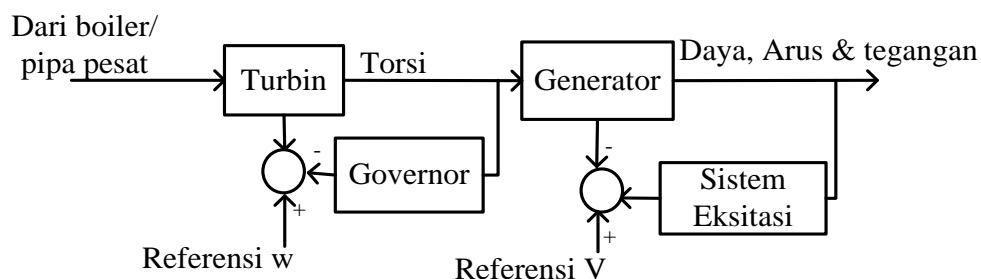
respon sistem berupa amplitudo yang besar dan ketidakseimbangan torsi saat terjadi gangguan.

### 2.2.3 Kestabilan Dinamik

Kestabilan dinamik sistem tenaga listrik adalah kestabilan sistem tenaga listrik akibat perubahan beban yang sangat kecil. Kestabilan dinamik ini sama dengan kestabilan *steady-state* namun yang membedakan yaitu sistem eksitasi, turbin, dan generator dimodelkan dengan memperhitungkan variasi medan magnet pada *air gap* mesin, sedangkan pada kestabilan *steady state* generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan yang konstan atau tidak terjadi variasi *flux*. Sumber lain menyebutkan bahwa kestabilan ini berarti kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan sinkronisasi setelah *initial swing* atau periode *transient* hingga kondisi titik keseimbangan *steady state*. Dalam kestabilan dinamik *governor* merespon terjadinya gangguan berupa membuka dan menutup untuk memberikan energi pada *prime mover* dan beberapa kontroler jaring kembali beroperasi dalam keadaan normal. Setelah respon dari *governor* ini sudut rotor akan berosilasi hingga tercapai kondisi stabil sesuai dengan kondisi beban yang baru. Penambahan beban yang sangat kecil ini adalah sebesar  $\geq 0,01$  dari total sistem [14].

## 2.2 Sistem Pembangkit Tenaga listrik

Pada sistem pembangkitan terdiri dari beberapa generator yang bisa berbeda-beda tergantung jenis pembangkitnya. Secara umum sistem pembangkit dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.1

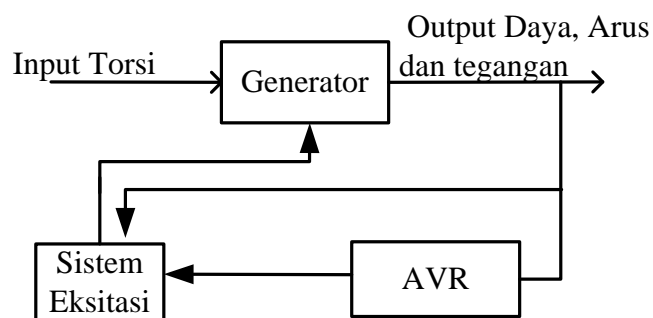


Gambar 2.1 Bentuk Umum Sistem Pembangkit

Apabila ada perubahan pada terminal keluaran generator, maka akan terjadi fungsi *feedback* yang diatur oleh *governor* untuk menyesuaikan kembali putaran rotor. Sedangkan sistem eksitasi adalah sistem pengendali keluaran generator, seperti tegangan, arus dan faktor daya. Bila ada perubahan pada keluaran generator tersebut, maka sistem eksitasi yang berfungsi untuk mengendalikan generator agar menyesuaikan dan mencari titik keseimbangan baru. Kedua peralatan sistem kontrol tersebut mempunyai perbedaan waktu respon. *Governor* mempunyai respon yang lambat terhadap perubahan beban, sedangkan sistem eksitasi responnya lebih cepat, sehingga dalam studi kestabilan dinamik yang diperhatikan adalah sistem eksitasi. Perubahan beban atau gangguan kecil, akan berimbas terhadap perubahan kecepatan rotor. Perubahan kecepatan rotor ini secara langsung akan berakibat terhadap perubahan kecepatan sudut rotor sehingga berimbas pada keluaran generator. Jika kecepatan sudut rotor akan berosilasi di sekitar nilai sinkronnya, maka tegangan keluarannya akan berosilasi di sekitar harga nominal. Dapat disimpulkan bahwa kestabilan dinamis didapat dari adanya perubahan beban kecil atau gangguan yang mengakibatkan perubahan kecepatan sudut rotor dan tegangan keluaran namun sistem pembangkitannya yaitu *governor* dan sistem eksitasi mampu menyesuaikannya dan menemukan titik keseimbangan baru [1,13-14].

### 2.3 Mesin Sinkron Tunggal

Diagram blok mesin sinkron yang berfungsi sebagai generator beserta dengan pengendali sistem eksitasi dinyatakan seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram Blok Generator Sinkron

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika sistem tenaga listrik yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Energi listrik yang dihasilkan generator atau pembangkit listrik berawal dari rotor yang dialiri arus DC oleh sistem eksitasi. Kemudian rotor diputar oleh torsi mekanik dari turbin sehingga menghasilkan medan putar yang memotong fluksi magnetik belitan konduktor di stator, maka akan timbul tegangan di stator yang besarnya :

$$E = C . n . \phi \quad (2.1)$$

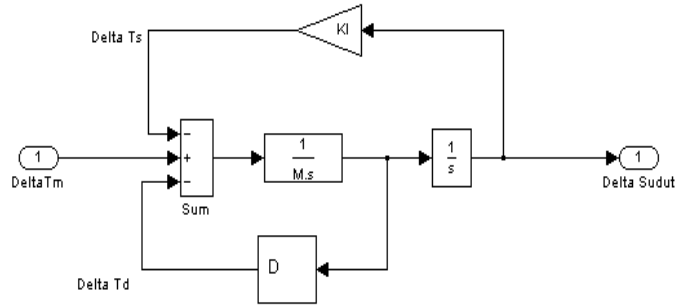
dengan E adalah tegangan di belitan stator, n kecepatan putar poros generator,  $\phi$  adalah fluksi dan C adalah konstanta pembanding. Jika generator dibebani. Maka akan timbul torsi yang bersifat melawan torsi mekanik, yaitu torsi elektrik. Pada kondisi sinkron besar kedua torsi ini adalah sama, namun sesaat sebelum sinkron, persamaan hubungan kedua torsi ini adalah [1,13]

$$\sum T = M . a \quad (2.2)$$

$$T_m - T_e = M . \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.3)$$

$$T_m - T_e = \frac{1}{t_{ij}s} \frac{1}{s} \theta \quad (2.4)$$

Dengan T adalah torsi total generator, dengan M adalah momen inersia dari sistem generator ( $1/t_{ij}$ : konstanta waktu dari generator), a adalah percepatan putar atau turunan kuadrat dari  $\theta$ ,  $\theta$  adalah sudut mekanik rotor generator,  $T_m$  adalah torsi mekanik dan  $T_e$  adalah torsi elektrik. Model mekanik generator sinkron dinyatakan seperti pada Gambar 2.3 .



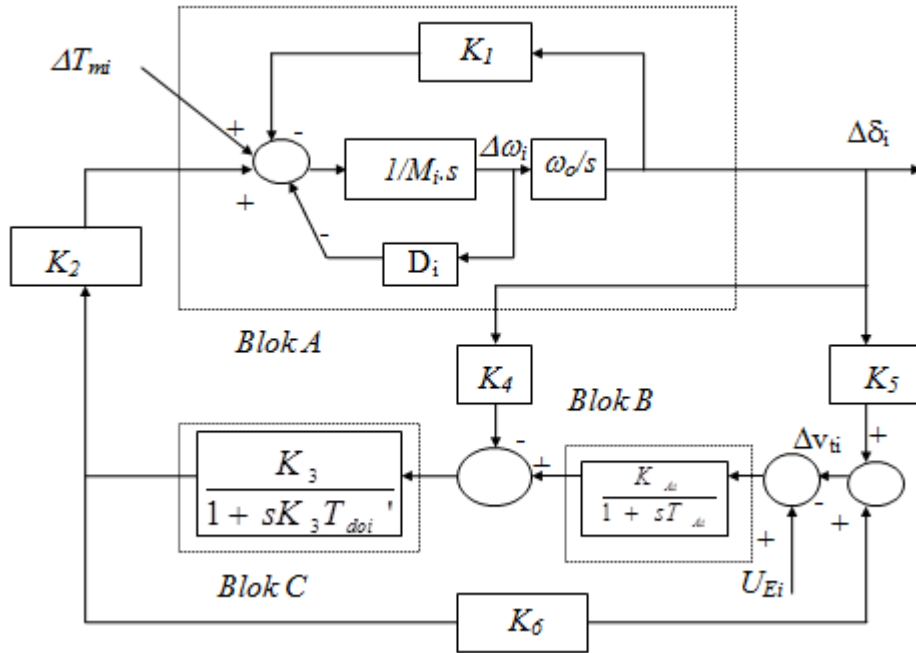
Gambar 2.3 Diagram Blok Mode Mekanik Generator

Dijelaskan pada Gambar 2.3 bahwa perubahan sudut daya rotor ( $\Delta\delta$ ) akan menimbulkan Torsi Sinkronisasi ( $T_s$ ). Torsi ini melawan perubahan ( $\Delta\delta$ ) tersebut. Sedangkan perubahan  $\Delta\omega$  akan menimbulkan Torsi Redaman ( $T_d$ ), yang sifatnya juga melawan perubahan  $\Delta\omega$ . Persamaan untuk menyatakan pernyataan di atas adalah sebagai berikut:

$$T_s = K_I \cdot \Delta\delta \quad (2.5)$$

$$T_d = D \cdot \Delta\omega \quad (2.6)$$

dengan  $K_I$  adalah koefisien torsi sinkronisasi dan  $D$  adalah koefisien torsi redaman. Sedangkan  $T_s$  adalah sefase dengan  $\Delta\delta$ , begitu pula  $T_d$  sefase dengan  $\Delta\omega$ . Hubungan antara sudut daya  $\Delta\delta$  dengan harga  $K_I$  adalah apabila harga  $K_I$  negatif, maka sudut daya mesin sinkron tidak akan berhenti di satu nilai, namun akan terus berosilasi bertambah atau berkurang di sekitar nilai tertentu. Begitu pula dengan nilai  $D$  yang negatif akan menyebabkan osilasi mesin akan semakin besar. Ini dikatakan sistem yang tidak stabil, karena terjadi osilasi yang tidak bisa teredam. Jadi, untuk mencapai sistem yang stabil, maka harga  $K_I$  dan  $D$  harus positif. Jika tidak maka akan terjadi umpan balik positif yang akan mengakibatkan osilasi yang semakin besar [1,14].



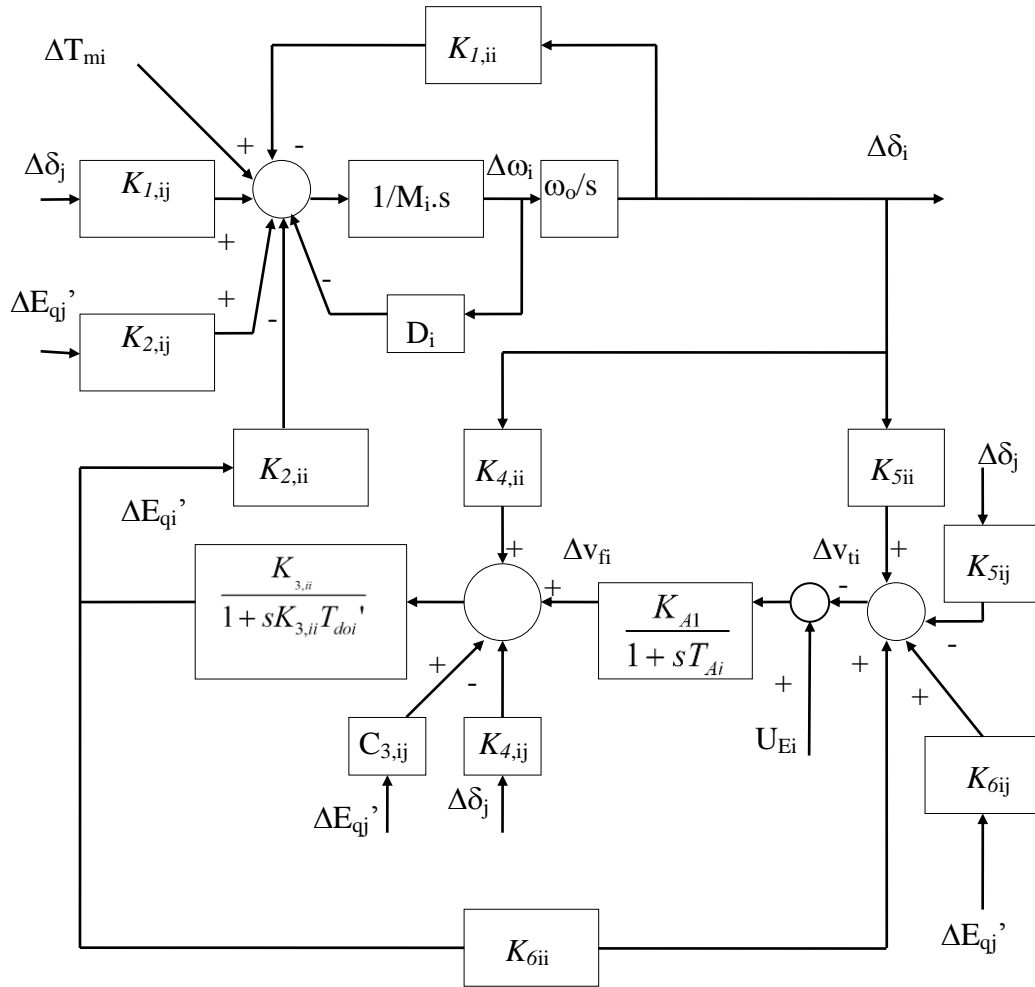
Gambar 2.4 Diagram Blok Dinamika Gerak Mesin

Blok A pada Gambar 2.4 menyatakan dinamika gerak mekanik generator. Fungsi transfer dalam blok B menyatakan proses yang terjadi di *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Fungsi transfer pada blok C menyatakan hubungan tegangan jepit generator dengan tegangan di rangkaian medan. Reaksi jangkar diwakili oleh umpan balik lewat  $K_4$  dan proses pengaruh perubahan tegangan terminal diwakili oleh umpan balik lewat  $K_5$ . Variabel  $K_1$  sampai dengan  $K_6$  merupakan variabel transfer yang besarnya tergantung dari konfigurasi jaring dan pembebanan [13].

## 2.4 Sistem Multi Mesin

Dalam sistem multi mesin, perubahan keadaan suatu mesin akan mempengaruhi keadaan mesin yang lain. Hal ini disebabkan karena antara mesin yang satu dengan mesin yang lain terhubung secara elektrik melalui jaring transmisi. Misal perubahan sudut rotor pada mesin  $i$  ( $\delta_i$ ) akan mempengaruhi besaran-besaran mesin  $j$  seperti  $\delta_j$ ,  $\omega_j$  dan tegangan jepit.





Gambar 2.5 Diagram Blok Dinamika Gerak Mesin i dengan Interaksi Dinamik

Diagram blok pada Gambar 2.4 menyatakan dinamika gerak mesin i (mesin yang ditinjau) tanpa memasukkan pengaruh dari mesin lain (mesin j) [15]. Bila pengaruh dari mesin lain dimasukkan, maka Gambar 2.4 akan menjadi Gambar 2.5. Variabel  $K_{ij}$  pada Gambar 2.5 menyatakan pengaruh mesin j terhadap mesin i. Keterangan rumus pada Gambar 2.5 adalah sebagai berikut :

$$K_{1,ii} = \sum_{j \neq i} K_{1,ij} \quad (2.7)$$

$$K_{1,ij} = E_{qi}' E_{qj}' y_{ij} S_{ij} \quad (2.8)$$

$$K_{2,ii} = 2G_{ii} E_{qi}' - \sum_{j \neq i} E_{qj}' y_{ij} C_{ij} \quad (2.9)$$

$$K_{2,ij} = E_{qi}' y_{ij} C_{ij} \quad (2.10)$$

$$C_{3,ii} = 1 - (x_{di} - x_i') B_{ii} \quad (2.11)$$

$$K_{4,ii} = \sum_{j \neq i} K_{4,ij} \quad (2.12)$$

$$C_{3,ij} = (x_{di} - x_i') y_{ij} S_{ij} \quad (2.13)$$

$$K_{4,ij} = (x_{di} - x_i') E_{qi}' y_{ij} C_{ij} \quad (2.14)$$

$$K_{5,ii} = \sum_{j \neq i} K_{5,ij} \quad (2.15)$$

$$K_{5,ij} = E_{qi}' y_{ij} x_i' \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i) \quad (2.16)$$

$$K_{6,ii} = \cos \gamma_i - x_i' y_{ii} \sin(\beta_{ii} - \gamma_i) \quad (2.17)$$

$$K_{6,ij} = x_i' y_{ij} \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i) \quad (2.18)$$

dengan:

$$\gamma_i = \tan^{-1}(v_{di} / v_{qi}) \quad (2.19)$$

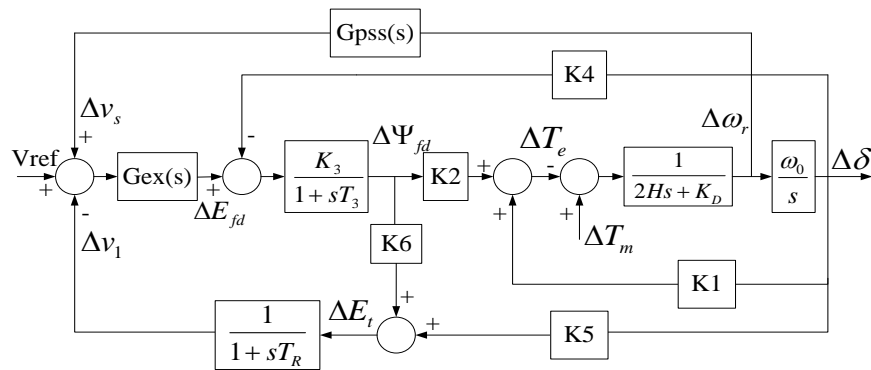
$$S_{ij} \cong \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (2.20)$$

$$C_{ij} \cong \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (2.21)$$

dengan  $C_{3,ij}$  yang merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan *flux linkage* mesin j (diwakili oleh  $E_{qi}'$ ) terhadap perubahan tegangan medan ( $\Delta V_f$ ) mesin i. Pengaruh yang ditimbulkan dapat penambahan atau pengurangan tergantung pada nilai  $C_{3,ij}$  pada suatu kondisi pembebanan.  $K_{4,ij}$  merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j ( $\Delta \delta_j$ ) terhadap perubahan tegangan medan ( $\Delta V_f$ ) mesin i. Pengaruh yang ditimbulkan dapat penambahan atau pengurangan tergantung pada nilai  $K_{4,ij}$  pada suatu kondisi pembebanan.  $K_{5,ij}$  merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j ( $\Delta \delta_j$ ) terhadap perubahan tegangan terminal ( $V_t$ ) mesin i. Pengaruh yang ditimbulkan dapat penambahan atau pengurangan tergantung pada nilai  $K_{5,ij}$  pada suatu kondisi pembebanan.  $K_{6,ij}$  merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan *flux linkage* mesin j (diwakili oleh  $E_{qi}'$ ) terhadap perubahan tegangan terminal ( $V_t$ ) mesin i. Pengaruh yang ditimbulkan dapat penambahan atau pengurangan tergantung pada nilai  $K_{6,ij}$  pada suatu kondisi pembebanan.

## 2.5 Power System Stabilizer

PSS banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk memperbaiki kestabilan dinamik, PSS digunakan sebagai kontroler sistem eksitasi untuk menambah redaman pada osilasi rotor. Untuk menghasilkan komponen redaman PSS memproduksi komponen torsi elektrik yang sesuai dengan deviasi pada kecepatan rotor. PSS harus ditala dengan tepat, untuk membantu exciter dalam meredam osilasi dapat digambarkan dalam Gambar 2.6. PSS menerima input berupa perubahan kecepatan rotor untuk menghasilkan sinyal tambahan sebagai kontrol *exciter*. *Exciter* mempengaruhi besar tegangan medan yang dihasilkan pada sisi rotor dan mempengaruhi besar fluks magnetik yang dibangkitkan. Fluks magnetik berbanding lurus dengan besar torka elektrik yang dihasilkan pada mesin. Torka elektrik melawan besar torka mekanik untuk meredam osilasi frekuensi yang terjadi pada mesin [1].

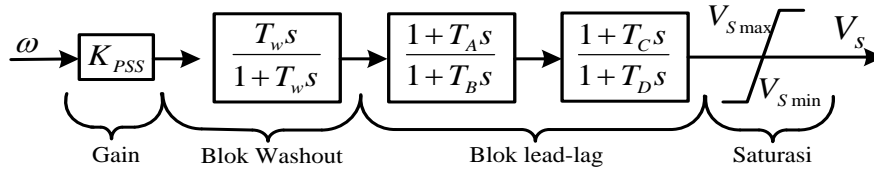


Gambar 2.6 Blok Diagram Mesin PSS dan AVR

Agar dapat berfungsi dengan baik, PSS harus ditala dengan tepat. Metode desain PSS secara umum melibatkan frekuensi respon yang berdasarkan pada konsep peningkatan redaman torsi. Transfer function PSS ditala untuk menyediakan karakteristik *phase-lead* yang tepat untuk mengkompensasi *phase-lag* antara frekuensi input automatic voltage regulator  $\Delta v_s$  dan torsi elektrik [1]. Sehingga, komponen torsi elektrik sephase dengan variasi kecepatan untuk memperbaiki redaman. Dengan menggunakan model matematika PSS yang sederhana, sehingga model matematika PSS dapat ditulis,

$$V_s = K_{pss} \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left[ \frac{(1 + sT_A)}{(1 + sT_B)} \frac{(1 + sT_C)}{(1 + sT_D)} \right] \omega \quad (2.22)$$

dengan mengasumsikan bahwa output dari PSS adalah  $V_s$  dengan input  $\Delta\omega$ , maka Persamaan 2.21 dapat ditulis dalam diagram blok pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Blok Diagram PSS

Blok diagram PSS pada Gambar 2.7 terdiri dari satu blok *gain*, satu blok *washout*, 2 blok *lead-lag*, dan *limiter*. Fungsi dari masing-masing blok adalah sebagai berikut :

### 1. Blok gain

*Gain* berfungsi untuk mengatur besar penguatan agar diperoleh besaran torsi sesuai dengan yang diinginkan. Sinyal input PSS dapat diambil dari berbagai macam sinyal seperti perubahan rotor, keluaran daya listrik atau frekuensi terminal bus.

### 2. Blok washout filter

*Wash out filter* berfungsi untuk menyediakan bisa *steady state* output PSS yang akan memodifikasi tegangan terminal generator. PSS diharapkan hanya dapat merespon variasi *transient* dari sinyal kecepatan rotor generator dan tidak untuk sinyal DC offset. *Wash out filter* bekerja sebagai *high pass filter* yang akan melewatkan semua frekuensi yang diinginkan. Apabila hanya mode lokal yang diinginkan, nilai  $T_w$  dapat dipilih dalam range 1 sampai 2. Tetapi, jika mode interarea juga ingin diredam, maka nilai  $T_w$  harus dipilih dalam interval 10 sampai 20. Nilai  $T_w$  yang lebih tinggi dapat memperbaiki respon tegangan sistem selama *island operation*.

### 3. Blok lead-lag

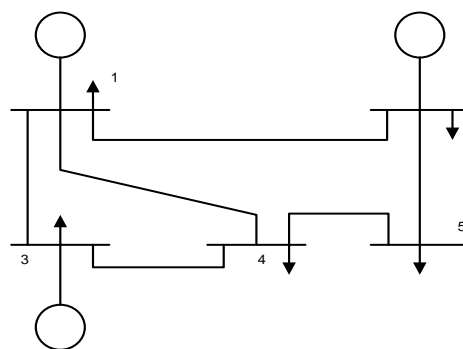
*Lead-Lag* berfungsi sebagai penghasil karakteristik *phase-lead* yang sesuai untuk mengkompensasi *phase-lag* antara masukan eksitasi dan torsi generator.

#### 4. Limiter

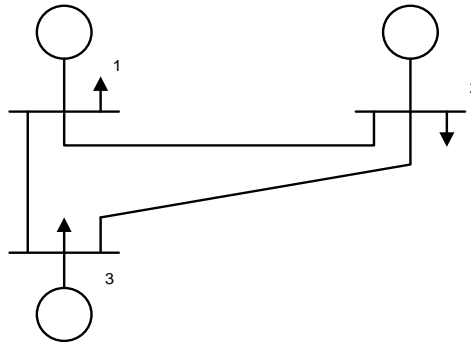
Output PSS dibatasi agar aksi PSS pada AVR sesuai dengan yang diharapkan.. Sebagai contoh, pada saat terjadi pelepasan beban, AVR beraksi untuk mengurangi tegangan terminal generator pada saat PSS menghasilkan sinyal kontrol untuk menaikkan tegangan (karena kecepatan rotor generator bertambah besar pada saat terjadi pelepasan beban). Pada kondisi ini sangat diperlukan untuk menonaktifkan PSS. Hal ini menunjukkan pentingnya pembatasan nilai sinyal output PSS yang dapat dilakukan oleh blok *limiter*. Perlu diperhatikan bahwa, nilai Batasan negatif yang tinggi dapat mengganggu kestabilan swing yang pertama. Fungsi dasar PSS adalah untuk memperluas batas stabilitas dengan mengatur eksitasi generator untuk menyediakan peredaman pada osilasi rotor-rotor mesin sinkron yang saling berhubungan (untuk sistem multi mesin). Osilasi-osilasi ini khusus terjadi dalam range frekuensi sekitar 0,2 sampai 3 Hz [4]. Bila peredaman tidak cukup osilasi ini bisa membatasi kemampuan untuk menyalurkan daya. Untuk menyediakan peredaman stabilizer harus menghasilkan komponen torsi listrik pada rotor yang sejalan dengan perbedaan kecepatan.

#### 2.6 Reduksi Admittansi Matrik Jaring

Reduksi matrik admittansi jaring ini dimaksudkan untuk mereduksi matrik admittansi jaring  $Y_{BUS}$  menjadi matrik admittansi jaring reduksi  $Y_{RED}$  dengan mereduksi bus-bus *non* generator [13]. Penggambaran reduksi matrik admittansi jaring dapat digambarkan pada Gambar 2.8 dan 2.9.



Gambar 2.8 Penggambaran Jaring Sistem Tenaga Sebelum Direduksi

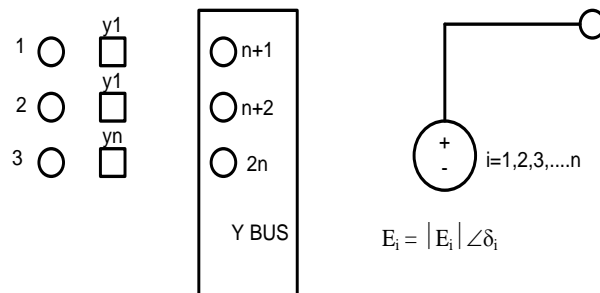


Gambar 2.9 Penggambaran Jaring Sistem Tenaga Setelah Direduksi

Jaring ekivalen seperti Gambar 2.9 didapatkan dari proses reduksi, bus beban 4 dan 5 menjadi hilang. Langkah-langkah dalam melakukan reduksi matrik adalah sebagai berikut. Misalkan sebuah jaring sistem tenaga memiliki  $n$  buah bus generator dan  $m$  buah bus non generator (bus beban). Matrik Admitansi busnya adalah sebagai berikut :

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ m \end{matrix} \quad (2.23)$$

Masing-masing generator dinyatakan sebagai sumber tegangan  $E_i = |E_i| \angle \delta_i$  seri dengan reaktansi transien  $y_i$ . Lihat Gambar 2.10



Gambar.2.10 Representasi Jaring sistem Tenaga

Node internal dari generator diberi nomor 1,2,... $n$ . Sedangkan untuk bus jaring diberi nomor  $n+1, n+2, \dots, 2n+m$ . Dengan mengeliminir sumber tegangan dan dengan

menyatakan admitansi transien generator sebagai  $y$  didapat matrik jaring  $\hat{Y}_{BUS}$  sebagai berikut :

$$\hat{Y}_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_1 + y_g & Y_2 \\ Y_3 & Y_1 + y_1 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ m \end{matrix} \quad (2.24)$$

Beban-beban yang ada pada bus ditransfer menjadi admitansi sebagai berikut :

$$Y_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{|V_i|^2} \quad i = n+1, \dots, 2n+m \quad (2.25)$$

Dengan notasi lain matrik pada persamaan 2.24 dapat ditulis :

$$\hat{Y}_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_C \\ Y_B & Y_D \end{bmatrix} \begin{matrix} n & n+m \\ n & n+m \end{matrix} \quad (2.26)$$

Persamaan-persamaan jaring adalah :

$$\begin{bmatrix} I_A \\ 0 \end{bmatrix} = [\hat{Y}_{BUS}] \begin{bmatrix} V_A \\ V_D \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Eliminasi bus  $(n+m)$  menghasilkan matrik  $Y_{RED}$  :

$$Y_{RED} = [Y_A - Y_B \cdot Y_D^{-1} \cdot Y_C] \quad (2.28)$$

Dalam hal ini berlaku :

$$I_A = [Y_{RED}] \cdot V_A \quad (2.29)$$

## 2.7 Differential Evolution

Teknik optimisasi yang disebut *Diferensial Evolution* (DE) diperkenalkan antara tahun 1994-1996. DE adalah teknik optimisasi pencarian penduduk berdasarkan dan ditandai oleh kesederhanaan, ketahanan, variabel kontrol beberapa dan konvergensi cepat [11, 16]. Dalam *International Contest on Evolutionary Optimization* (ICEO) yang pertama, DE menjadi salah satu

algoritma genetika terbaik dan dapat menemukan global optimum yang multi dimensi dengan probabilitas yang baik. Kelebihan DE dibanding dengan metode algoritma evolusioner sebelumnya adalah adanya evolusi yang dialami oleh setiap individu dalam populasi dimana diferensiasi dan crossover terjadi secara berurutan pada setiap individu yang terpilih acak dari populasi setiap waktu. Hasil dari variasi ini dikenal sebagai *child* (turunan) atau trial individual yang akan menggantikan parents pada populasi apabila fitness yang dihasilkan lebih baik atau sama dengan yang dihasilkan parents.

### 2.8.1 Inisialisasi

Sebelum populasi dapat diinisialisasi, *upper* dan *lower bounds* untuk setiap parameter harus ditentukan, yaitu dengan vektor inisialisasi D-dimensi  $b_L$  dan  $b_U$ . L menunjukkan *lower* dan U menunjukkan *upper*. Berikutnya adalah membangkitkan bilangan acak untuk setiap parameter  $j$  dari vektor  $i$  pada iterasi  $g$ . Misal nilai inisial ( $g = 0$ ):

$$x_{j,i,0} = rand_j(0,1) \cdot (b_{j,U} - b_{j,L}) + b_{j,L} \quad (2.30)$$

bilangan acak di atas dibangkitkan berdasarkan distribusi uniform pada rentang  $[0,1)$  atau  $0 \leq rand_j(0,1) < 1$ . Selain menggunakan distribusi uniform, DE dapat membangkitkan bilangan acaknya dengan distribusi yang lain. Keputusan menggunakan distribusi tertentu dalam pembangkitan bilangan acak ini tergantung pada pengetahuan terhadap lokasi titik optimal.

### 2.8.2 Mutasi

Setelah diinisialisasi, DE akan memutasi dan me-rekombinasi populasi awal untuk menghasilkan populasi baru. Mutasi pada beberapa kamus bahasa menunjukkan pengertian berubah dan dalam konteks genetika mutasi berarti perubahan dengan elemen acak. Berikut ini adalah persamaan yang menunjukkan bagaimana membentuk vektor mutan,  $v_{i,g}$ :

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.31)$$

dengan  $r0, r1, r2$  adalah indeks acak, integer, dan berbeda. Indeks basis vektor,  $r0$ , dapat ditentukan dengan berbagai cara antara lain acak, permutasi, stokastik,



dan acak offset. Sedangkan untuk  $r1$  dan  $r2$  dipilih secara acak sekali untuk setiap mutan.

### 2.8.3 Crossover

Untuk melengkapi strategi pencarian *differential mutation*, DE menggunakan *crossover* dengan tujuan meningkatkan diversitas parameter populasi. *Crossover* membangun vektor uji dari nilai parameter yang telah dikopi dari dua vektor yang berbeda. Persamaan untuk vektor uji adalah sebagai berikut:

$$u_{i,g+1} = (u_{1i,g+1}, u_{2i,g+1}, \dots, u_{ni,g+1}) \quad (2.32)$$

dengan,

$$u_{i,g+1} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{if } (rand_j(0,1) \leq CR) \\ & \text{or } j = j_{rand} \\ x_{j,i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.33)$$

Dalam persamaan (2.33),  $rand_j(0,1)$  adalah evaluasi ke- $j$  dari pembangkitan bilangan acak. CR adalah konstanta *crossover* yang ditentukan oleh pembuat model,  $j_{rand}$  adalah indeks yang dipilih secara acak.

### 2.8.4 Seleksi

Seleksi dilakukan dengan menggunakan nilai-nilai objektif. Untuk menjaga ukuran populasi konstan dari generasi ke generasi berikutnya, proses seleksi dilakukan untuk menentukan salah satu dari anak dan orang tua akan bertahan di generasi berikutnya. Jika anak menghasilkan nilai yang lebih baik dari fungsi kebugaran, menggantikan induknya di generasi berikutnya; sebaliknya, orang tua masih dipertahankan dalam populasi. Oleh karena itu populasi baik akan lebih baik dalam hal fungsi fitness atau tetap konstan tetapi tidak pernah memburuk.

### 2.8.5 Kriteria Penghentian Iterasi (Konvergensi)

Setelah populasi baru dihasilkan dalam tahapan seleksi, proses mutasi, rekombinasi, dan seleksi akan terus berulang hingga mencapai optimal. Perulangan hingga global optima pada beberapa kondisi akan memakan waktu

yang sangat lama, karena itulah dibutuhkan kriteria yang dapat menunjukkan kapan iterasi akan berhenti. Batasan iterasi ini antara lain:

1. Nilai fungsi tujuan pada toleransi tertentu tercapai
2. Jumlah maksimum iterasi yang dilakukan
3. Penentuan statistik populasi mendekati angka tertentu
4. Penentuan lama waktu iterasi

Ketika mencapai salah satu batas iterasi ini maka pencarian titik optimal akan berhenti dan vektor populasi yang memberikan nilai fungsi terbaik sampai saat itu akan menjadi titik optimal.

## 2.8 *Modified Differential Evolution*

*Modified Differential Evolution* (MDE) adalah algoritma DE yang mengalami proses modifikasi. MDE memanipulasi atau memodifikasi persamaan pada proses mutasi dari DE. Pada proses mutasi yang dilakukan MDE masing-masing orang tua dapat menghasilkan sejumlah keturan yang sesuai dengan parameter pengguna (user define), untuk meningkatkan kemungkinan memperoleh keturunan yang lebih baik. Keturunan baru diperoleh dengan informasi solusi terbaik pada populasi dan informasi pada orang tua yang dikombinasikan dalam sebuah proses mutasi [17]. Persamaan mutasi pada MDE adalah sebagai berikut:

$$u_{j,G+1}^i = x_{j,G}^{r3} + F_{\alpha}(x_{j,G}^{best} - x_{j,G}^{r2}) + F_{\beta}(x_{j,G}^i - x_{j,G}^{r1}) \quad (2.34)$$

Keturunan terbaik dipilih berdasarkan 3 kriteria, yaitu:

1. Antara dua solusi, dipilih solusi yang memiliki nilai *fitness* tertinggi
2. Jika salah satu solusi yang layak dan yang lainnya tidak layak, maka dipilih solusi yang layak.
3. Jika kedua solusi tidak layak, maka dipilih solusi yang paling mendekati fungsi objektif.

## 2.9 Fungsi Objektif

Dalam rangka mencari parameter PSS yang optimal, PSO untuk menala parameter PSS ( $K_{pss}$ ,  $T_w$ ,  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ , dan  $T4$ ). Hasil dari penalaan ini kemudian dianalisa untuk mendapatkan respon yang baik. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah *Comprehensive Damping Index* (CDI) yang dirumuskan [18]:

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (2.35)$$

$$CDI = \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_i) \quad (2.37)$$

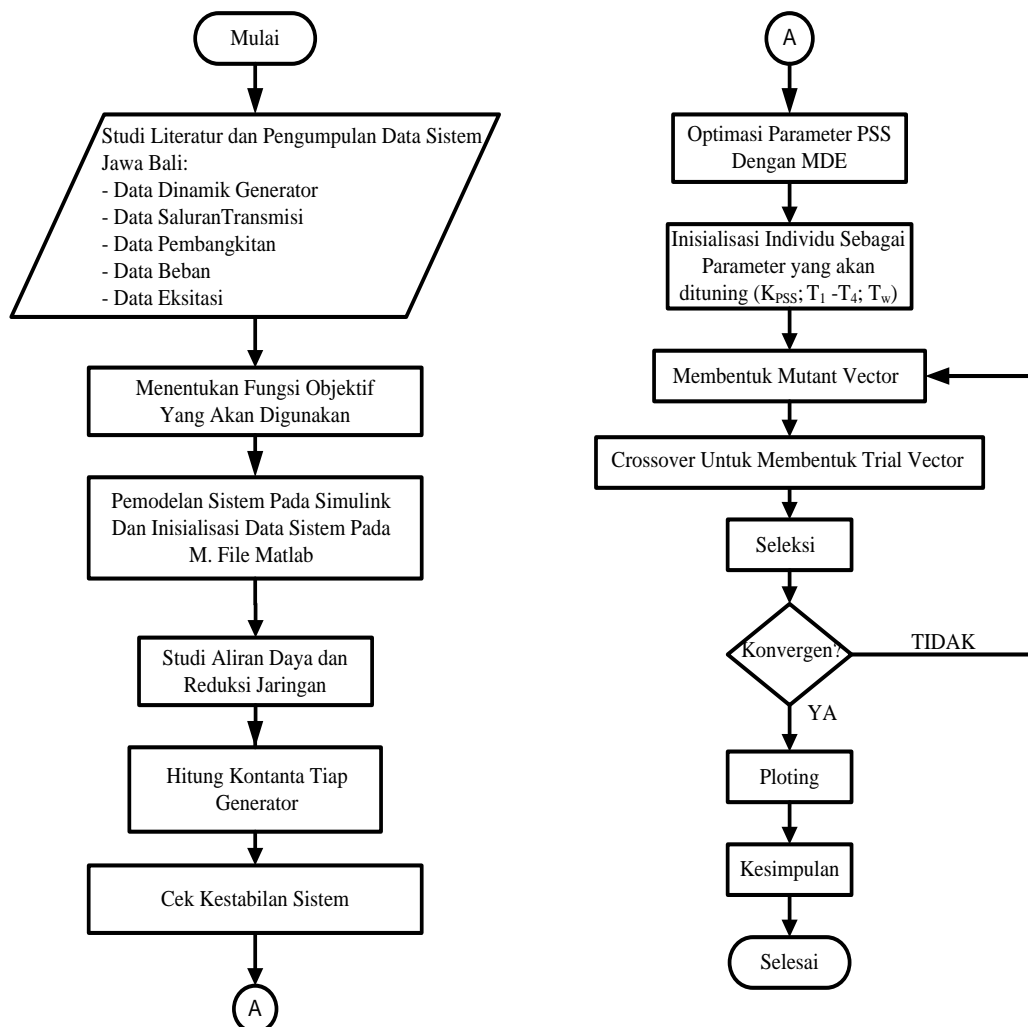
*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB 3

### METODA PENELITIAN

#### 3.1 Flowchart Penyelesaian Tesis

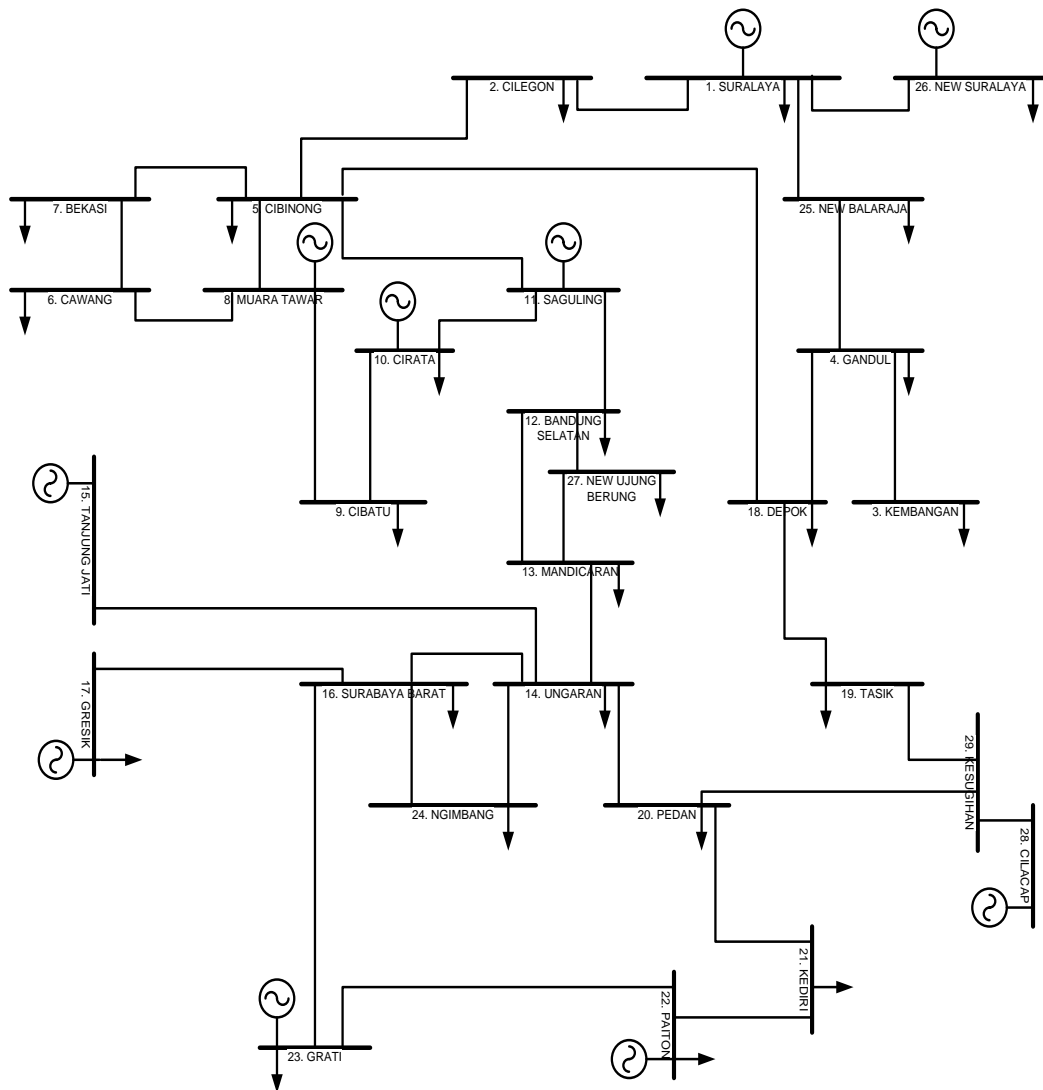
Pada Tesis ini, PSS digunakan pada sistem multimesin Jawa Bali 500 kV. Untuk mendapatkan parameter PSS yang optimal, PSS dioptimisasi menggunakan MDE. Simulasi ini menguji kinerja PSS yang dipasang pada pembangkit di Suralaya saat terjadi perubahan beban. Pengolahan data dan simulasi dikerjakan dengan menggunakan software MATLAB-SIMULINK. Flowchart pengerjaan Tesis ini ditunjukkan seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Flowchart Penyelesaian Tesis

### 3.2 Pengambilan Data Lapangan

Data yang digunakan dalam simulasi adalah data sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV meliputi data sistem interkoneksi jaringan, data Generator dan data beban.



Gambar 3.2 Sistem Interkoneksi Jaringan Transmisi Tegangan 500 kV Jawa-Bali

Data sistem multimesin Jawa Bali 500 kV yang digunakan adalah data yang diperoleh dari PT. PLN per 14 Maret 2016 yang terdiri dari 29 bus, 35 saluran, 1 buah *slack bus*, 9 buah generator bus dan 24 buah *load bus*. Data parameter mesin dan saluran Jawa Bali 500 kV ditunjukkan pada Tabel 3.1 - 3.2.

Tabel 3. 1 Parameter Dinamik Mesin

<b>Pembangkit</b>	<b>X<sub>d</sub> (pu)</b>	<b>X<sub>d</sub>' (pu)</b>	<b>H</b>	<b>T<sub>d0</sub> (pu)</b>	<b>K<sub>s</sub> (pu)</b>	<b>T<sub>s</sub> (pu)</b>	<b>K<sub>a</sub></b>	<b>T<sub>a</sub></b>	<b>K<sub>e</sub></b>	<b>T<sub>e</sub></b>	<b>K<sub>f</sub></b>	<b>T<sub>f</sub></b>
Suralaya	2,19	0,297	5,19	9,45	20	2	400	0,05	15	0,07	20	0,2
Muaratawar	2,12	0,297	1,82	9,45	20	2	100	0,02	12	0,01	20	0,2
Cirata	0,88	0,274	2,86	9,99	18	3	100	0,04	11	0,01	20	0,2
Saguling	0,93	0,303	1,64	8	18	3	100	0,02	9	0,01	20	0,1
Tanjungjati	16,393	0,2588	3,2	4,57	20	2	100	0,05	12	0,01	18	0,1
Gresik	2,12	0,297	2,54	9,45	20	3	300	0,04	11	0,02	17	0,1
Paiton	2,19	0,297	4,42	9,45	20	2	400	0,05	14	0,07	20	0,2
Grati	2,12	0,297	2,76	9,45	20	2	100	0,04	10	0,01	12	0,2
New Suralaya	2,12	0,297	2,76	9,45	20	2	100	0,04	10	0,01	12	0,2
Cilacap	2,12	0,297	2,76	9,45	20	2	100	0,04	10	0,01	12	0,2

Tabel 3. 2 Data Saluran Transmisi

<b>No. Bus</b>	<b>No. Bus</b>	<b>R (pu)</b>	<b>X (pu)</b>	<b>1/2 B (pu)</b>
1	25	0.000735535	0.00706666	0
1	26	0.00001465	0.00014075	0
2	1	0.000125299	0.00140175	0,003530571
2	5	0.001313332	0.01469258	0
3	4	0.000302636	0.00338566	0
4	18	0.00006942	0.00066693	0
5	8	0.00062116	0.0059678	0
5	18	0.00018248	0.00175318	0,004420973
6	7	0.000197365	0.00189618	0
6	8	0.00056256	0.0054048	0
7	5	0.000444188	0.00426754	0
8	9	0.000564412	0.00542259	0
9	10	0.000547992	0.00526484	0
10	11	0.000294946	0.00283369	0
11	5	0.000822276	0.00919901	0,006429135
11	12	0.00039156	0.00438048	0,012394812
13	12	0.001398196	0.01343318	0,003638261
13	27	0.00101296	0.00973202	0,003632219
14	13	0.0026956	0.025898	0
14	15	0.001353392	0.01514074	0
14	16	0.002979224	0.02862292	0
16	23	0.000797276	0.00891933	0
16	24	0.000597497	0.00574046	0,015114437
17	16	0.000280108	0.00269114	0,016463941
19	18	0.00280618	0.03139344	0,011065927
19	29	0.001390108	0.01555149	0,011065927
20	14	0.000903612	0.00868146	0,004769846
20	21	0.00205318	0.02296944	0
22	21	0.00205318	0.02296944	0,100970352
22	23	0.000882145	0.00986877	0
24	14	0.002347961	0.02255806	0
25	4	0.000595845	0.00572458	0
27	12	0.000385471	0.00370341	0
28	29	0.000276963	0.00309846	0
29	20	0.001667072	0.01864995	0



Secara berturut-turut Table 3.3 menunjukkan data kapasitas masing-masing generator yang beroperasi pada tanggal 14 Maret 2016 pukul 19.00 WIB, Tabel 3.4 menunjukkan data pembebanan dan pembangkitan pada masing-masing bus, serta Tabel 3.5 menunjukkan selisih kapasitas generator dengan pembangkitan.

Tabel 3. 3 Data Kapasitas Generator

Generator	MW	MVAR
	Max	Max
Suralaya	3211.6	1600
Muaratawar	1080	948
Cirata	948	360
Saguling	700.72	160
Tanjung Jati	2643.8	600
Gresik	1360	844
Paiton	4610	1080
Grati	800	340
New Suralaya	590	140
Cilacap	1150.4	600

Tabel 3.4 Beban dan Pembangkitan

No. Bus	Bus	Beban		Generator	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	Suralaya	75	73	2248	1021
2	Cilegon	-332	141	0	0
3	Kembangan	0	0	0	0
4	Gandul	863	-82	0	0
5	Cibinong	354	182	0	0
6	Cawang	529	111	0	0
7	Bekasi	1196	9	0	0
8	Muaratawar	0	0	439	209
9	Cibatu	1041	449	0	0
10	Cirata	620	207	346	190
11	Saguling	0	0	692	131
12	Bandung Selatan	505	242	0	0
13	Mandikaran	126	41	0	0
14	Ungaran	638	427	0	0
15	Tanjung Jati	180	98	2137	287

Tabel 3.4 Beban dan Pembangkitan (Lanjutan)

No. Bus	Bus	Beban		Generator	
		MW	MVAR	MW	MVAR
16	Surabaya Barat	1151	263	0	0
17	Gresik	287	-80	860	342
18	Depok	533	-29	0	0
19	Tasik	295	110	0	0
20	Pedan	697	221	0	0
21	Kediri	623	175	0	0
22	Paiton	894	212	4544	742
23	Grati	562	261	558	152
24	Ngimbang	198	78	0	0
25	New Balaraja	704	203	0	0
26	New Suralaya	45	-26	455	95
27	New Ujung Berung	-24	-4	0	0
28	Cilacap	0	0	502	177
29	Kesugihan	0	0	0	0

Tabel 3.5 Selisih Kapasitas dengan Pembangkitan Generator

Generator	MW	MVAR
	Max	Max
Suralaya	963.6	579
Muaratawar	641	739
Cirata	602	170
Saguling	8.72	29
Tanjung Jati	506.8	313
Gresik	500	502
Paiton	66	338
Grati	242	188
New Suralaya	135	45
Cilacap	648.4	423

Data pembangkitan dan beban pada 29 bus sistem Jawa bali disajikan Tabel 3.4. Terdapat 9 generator bus dan 1 sebagai *slack bus* pada pembangkit Suralaya, serta terdiri dari 19 bus beban.

### 3.3 Aliran Daya (*Load Flow*)

Penyelesaian analisis aliran daya diperlukan untuk mencari parameter multimesin. Penyelesaian aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson didasarkan pada:

Base daya : 1000 MVA

Akurasi : 0.00001

Maksimum iterasi : 1000

Bus-bus yang ada diklasifikasikan sebagai berikut:

Slack Bus : Suralaya

Bus Generator : Muaratawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik, Paiton Grati, New Suralaya, dan Cilacap

Bus Beban : Cilegon, Kembangan, Gandul, Cibinong, Cawang, Bekasi, Cibatu, Bandung Selatan, Mandiracan, Ungaran, Surabaya Barat, Depok, Tasik, Pedan, Kediri, Ngimbang, New Balaraja, New Ujung Berung, dan Kesugihan

Data pembangkitan dan beban digunakan untuk mencari proses *load flow* pada sistem, data pembangkitan harus lebih besar daripada data beban. Hasil *load flow* pada sistem disajikan pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Hasil *Load Flow Magnitude* Tegangan dan Sudut

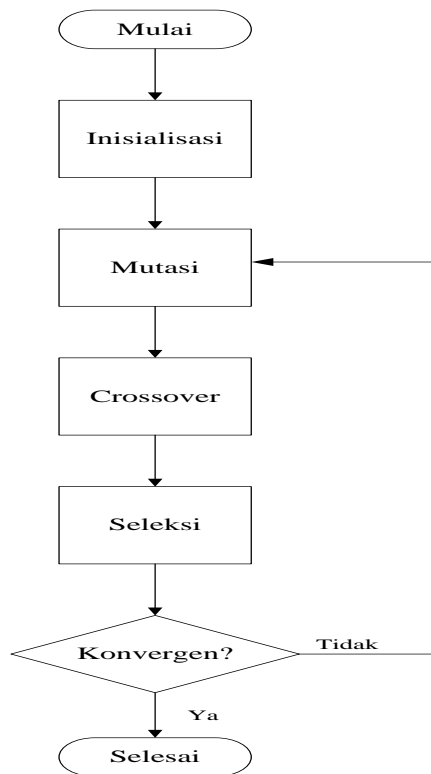
No	Nama bus	Tegangan (pu)	Sudut (°)
1.	Suralaya	1,020	0,000
2.	Cilegon	1,019	-0,095
3.	Kembangan	1,008	-0,823
4.	Gandul	1,008	-0,823
5.	Cibinong	1,007	-0,847
6.	Cawang	1,008	-1,134
7.	Bekasi	1,007	-1,135
8.	Muaratawar	1,010	-0,976
9.	Cibatu	0,998	-0,976
10.	Cirata	0,990	-0,661
11.	Saguling	0,990	-0,474
12.	Bandung Selatan	0,988	-0,215
13.	Mandiracan	0,988	0,382
14.	Ungaran	0,987	2,885
15.	Tanjung Jati	0,990	4,620
16.	Surabaya Barat	0,989	3,580

Tabel 3. 6 Hasil *Load Flow Magnitude* Tegangan dan Sudut (Lanjutan)

No	Nama bus	Tegangan (pu)	Sudut (°)
17.	Gresik	0,990	3,593
18.	Depok	1,008	-0,820
19.	Tasik	1,000	0,790
20.	Pedan	0,990	2,626
21.	Kediri	0,992	3,821
22.	Paiton	1,000	5,809
23.	Grati	0,990	4,363
24.	Ngimbang	0,988	3,388
25.	New Balaraja	1,013	-0,573
26.	New Suralaya	1,020	0,003
27.	New Ujung Berung	0,998	-0,054
28.	Cilacap	1,000	1,934
29.	Kesugihan	0,999	1,850

### 3.4 Optimisasi Parameter PSS Menggunakan MDE

PSS dipasang pada pembangkit Suralaya, karena pembangkit Suralaya memiliki sisa kapasitas terbesar jika dibandingkan dengan sisa kapasitas pada pembangkit yang lainnya (lihat Tabel 3.3-3.5), selain itu pembangkit Suralaya pada tanggal 14 Maret 2016 merupakan pembangkit yang bertugas sebagai slack (swing) bus. Dalam rangka mencari parameter PSS yang optimal, MDE menala parameter PSS. Secara umum terdapat 3 proses penting pada algoritma *Modified Differential Evolution*, yakni mutasi, crossover, dan seleksi. Flow chart dari *Modified Differential Evolution* dapat digambarkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Flowchart* Algoritma  
*Modified Differential Evolution*

Hasil dari penalaan ini kemudian dianalisa untuk mendapatkan respon yang baik. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah *Comprehensive Damping Index* (CDI). Sebelum mencari CDI, *eigenvalue* dari sistem harus didapat terlebih dahulu. *Eigenvalue* didapat dengan cara menggunakan fungsi “linmod” pada *m.file*. Parameter MDE yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.7. sedangkan batasan parameter PSS ditunjukkan pada parameter 3.8.

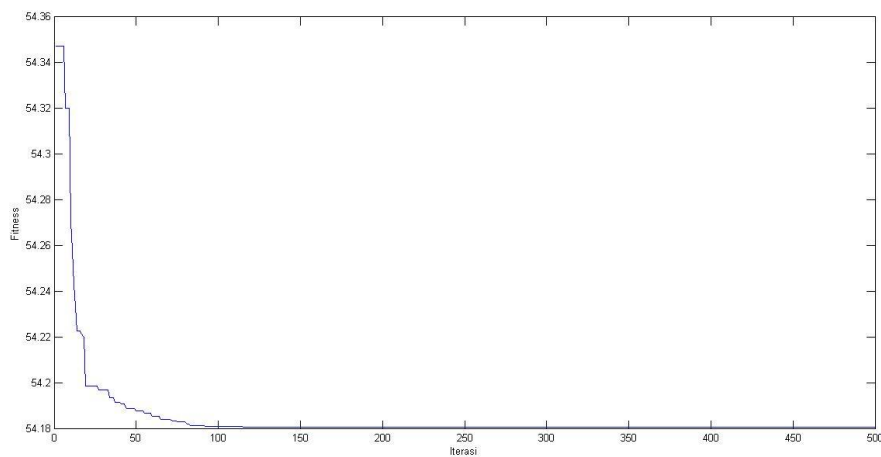
Tabel 3. 7 Data Parameter MDE

Parameter	Nilai
Ukuran populasi	60
Jumlah anak setiap iterasi	5
Fa	0.6
Fb	0.9
C	0,8
Iterasi	500
Dimensi	6

Tabel 3. 8 Batasan Parameter PSS

Parameter	Batas bawah	Batas atas
$K_{pss}$	100	200
$T_w$	4,5	5
$T_1$	1	7
$T_2$	0,001	0,1
$T_3$	1	10
$T_4$	0,001	0,1

Gambar 3.4 merupakan grafik konvergensi dari optimisasi parameter PSS menggunakan MDE serta CDI sebagai fungsi objektifnya. Nilai *fitness* didapatkan berdasarkan sebuah fungsi yang disebut fungsi objektif/tujuan. Optimisasi parameter PSS menggunakan MDE dilakukan sebanyak 500 iterasi. Pada Gambar 3.4 dapat dilihat MDE konvergen pada iterasi ke 115 atau menemukan nilai paling optimal adalah pada iterasi ke 115.



Gambar 3.4 Grafik Konvergensi MDE

Tabel 3.9 menunjukkan nilai parameter PSS setelah doptimisasi oleh MDE. Untuk nilai  $K_{pss}$  sebesar 200, nilai  $T_w$  sebesar 4,98,  $T_1$  sebesar 6,11,  $T_2$  sebesar 0,1,  $T_3$  sebesar 6,3, dan  $T_4$  sebesar 0,1.

Tabel 3. 9 Parameter Hasil Optomisasi MDE

$K_{pss}$	$T_w$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
200	4,98	6,11	0,1	6,3	0,1

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab 4 ini memaparkan tentang hasil optimisasi parameter PSS, Hasil simulasi sistem apabila diberi PSS serta analisa respon sistem. Setelah diperoleh parameter PSS hasil dari optimisasi maka dapat dilakukan simulasi sistem serta menganalisisnya. Analisa yang dilakukan adalah dengan membandingkan antara sistem tanpa PSS, sistem yang menggunakan PSS yang dioptimisasi dengan PSO, sistem yang menggunakan PSS yang dioptimisasi menggunakan DE, serta sistem yang menggunakan PSS yang dioptimisasi menggunakan MDE.

#### **4.1 Hasil Optimisasi Parameter PSS**

PSS dipasang pada pembangkit Suralaya, karena pembangkit Suralaya memiliki sisa kapasitas terbesar jika dibandingkan dengan sisa kapasitas pada pembangkit yang lainnya (lihat Tabel 3.3-3.5), selain itu pembangkit Suralaya pada tanggal 14 Maret 2016 merupakan pembangkit yang bertugas sebagai slack (swing) bus. Setelah penentuan tempat PSS, kemudian akan dilihat perbedaan sistem tanpa PSS, PSS yang dioptimisasi dengan menggunakan PSO, PSS yang dioptimisasi dengan menggunakan DE, serta PSS yang dioptimisasi dengan menggunakan MDE. Pemodelan linier sistem diberikan input berupa gangguan perubahan beban (penambahan beban) sebesar 0.05 pu. 0.05 pu ini dipilih karena sesuai teori yang ada, agar sistem tetap stabil maka perubahan beban yang dapat diberikan kepada sistem adalah maksimal 0.01 dari kapasitas sistem. Karena total kapasitas sistem Jawa Bali 500 kV adalah 17000 MW dengan base 1000 MVA, maka beban yang diberikan kepada sistem tidak boleh melebihi 0.17 pu, sehingga dipilihlah 0.05 pu. Penambahan beban dilakukan pada PLTU Suralaya, karena Suralaya bertugas sebagai slack kemudian dilihat respon sudut rotor dan kecepatan rotor pada masing-masing pembangkit. Hasil penalaan parameter PSS dengan PSO dan MDE ditunjukkan pada Tabel 4.1. penambahan beban pada pembangkit Suralaya

Tabel 4.1 Parameter PSS

Parameter	PSS PSO	PSS DE	PSS MDE
$K_{pss}$	200	196	200
$T_w$	4,99	5	4,98
$T_1$	3,9	5,6	6,11
$T_2$	0,1	0.0137	0,1
$T_3$	4,7	4.3	6,3
$T_4$	0,1	0.1	0,1

## 4.2 Perubahan Beban Sebesar 0.05 pu pada Pembangkit Suralaya

Untuk melihat respon pembangkit akibat perubahan beban, simulasi dilakukan dengan memberikan perubahan (penambahan) beban sebesar 0,05 pu pada pembangkit Suralaya pada detik ketiga. Setelah itu dilihat respon sudut rotor dan kecepatan rotor tiap pembangkit yang akan disajikan pada subbab 4.2.1 dan 4.2.2

### 4.2.1. Respon Perubahan Sudut Rotor Tiap Pembangkit

Respon perubahan sudut rotor terlihat pada Tabel 4.2 dan 4.3. Tabel 4.2 dan 4.3 dapat perbandingan respon perubahan sudut rotor yang lebih jelas antara sistem tanpa PSS, PSS PSO, PSS DE dan PSS MDE ketika terjadi penambahan beban sebesar 0.05 pu di pembangkit Suralaya. Perubahan beban yang berupa penambahan beban di pembangkit Suralaya mempengaruhi perubahan sudut rotor. Tidak hanya di genarotor Suralaya saja yang terjadi perubahan sudut rotor, perubahan sudut rotor juga terjadi di generato-pembangkit lainnya. Nilai perubahan sudut rotor terbesar terjadi pada pada pembangkit Suralaya, hal ini dikarenakan penambahan beban terjadi pada pembangkit Suralaya.

Tabel 4.2 Perbandingan Respon *Overshoot* Sudut Rotor

Pembangkit	Tanpa PSS	PSS PSO	PSS DE	PSS MDE
	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)
Suralaya	-0,026	-0,023	-0,024	-0,022
Muaratawar	$-12,5 \times 10^{-3}$	$-11,5 \times 10^{-3}$	$-12,2 \times 10^{-3}$	$-11 \times 10^{-3}$
Cirata	$-13 \times 10^{-3}$	$-11,9 \times 10^{-3}$	$-12,8 \times 10^{-3}$	$-11,5 \times 10^{-3}$
Saguling	$-12,5 \times 10^{-3}$	$-11,5 \times 10^{-3}$	$-12,3 \times 10^{-3}$	$-11,5 \times 10^{-3}$
Tanjung Jati	$-12,1 \times 10^{-3}$	$-10,5 \times 10^{-3}$	$-11,8 \times 10^{-3}$	$-10,5 \times 10^{-3}$
Gresik	$-11,8 \times 10^{-3}$	$-10 \times 10^{-3}$	$-11,5 \times 10^{-3}$	$-10 \times 10^{-3}$



Tabel 4.2 Perbandingan Respon *Overshoot* Sudut Rotor (Lanjutan)

Pembangkit	Tanpa PSS	PSS PSO	PSS DE	PSS MDE
	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)
Paiton	$-13,9 \times 10^{-3}$	$-11,5 \times 10^{-3}$	$-12 \times 10^{-3}$	$-11 \times 10^{-3}$
Grati	$-13,9 \times 10^{-3}$	$-11,8 \times 10^{-3}$	$-12,1 \times 10^{-3}$	$-10,8 \times 10^{-3}$
New Suralaya	$-13 \times 10^{-3}$	$-10,5 \times 10^{-3}$	$-11 \times 10^{-3}$	$-10,5 \times 10^{-3}$
Cilacap	$-13,2 \times 10^{-3}$	$-10 \times 10^{-3}$	$-11,5 \times 10^{-3}$	$-10 \times 10^{-3}$

Tabel 4.3 Perbandingan Respon *Settling Time* Sudut Rotor

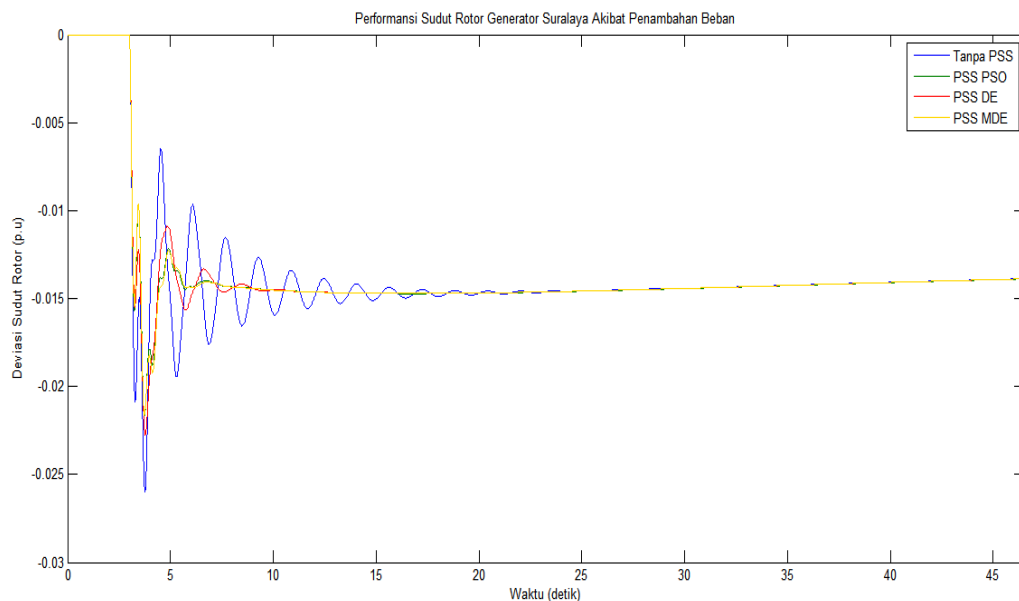
Pembangkit	Tanpa PSS	PSS PSO	PSS DE	PSS MDE
	Settling Time (s)	Settling Time (s)	Settling Time (s)	Settling Time (s)
Suralaya	>25	9	12	7
Muaratawar	>25	9	14	7
Cirata	>25	11	13	9
Saguling	>25	11	12	8
Tanjung Jati	>25	11	12	9
Gresik	>25	11	12	7
Paiton	>25	11	12	7
Grati	>25	11	12	7
New Suralaya	>25	10	11	7
Cilacap	>25	11	13	7

Untuk perubahan sudut rotor respon sistem yang terbaik adalah pada sistem yang diberi PSS dengan MDE sebagai optimisasinya (PSS MDE) hal ini dicontohkan pada pembangkit Suralaya yang menggunakan PSS MDE memiliki *overshoot* yang lebih kecil yakni  $-0,022$  pu dibandingkan dengan sistem tanpa PSS yakni sebesar  $-0,026$  pu. *Overshoot* adalah nilai puncak tertinggi dari suatu kurva atau gelombang yang diukur, namun perbedaan nilai *overshoot* ini antara dengan sistem dengan PSS dan tanpa PSS tidak terlalu berbeda jauh, tetapi jika dilihat dari sisi *settling time* perbedaan yang terjadi antara sistem dengan PSS dan sistem tanpa PSS sangat signifikan, seperti contoh di pembangkit Suralaya sistem yang terdapat PSS MDE memiliki *settling time* yang lebih cepat yakni 7 detik jika

dibandingkan pada sistem tanpa PSS yakni waktu yang dibutuhkan untuk *settling time* adalah lebih dari 25 detik.

Ketika sistem diberi tambahan beban akan menyebabkan turunnya daya mekanik pada pembangkit, sehingga daya mekanik generator lebih kecil dibandingkan dengan daya elektrik pembangkit dan akan menyebabkan perlambatan. Perlambatan inilah yang akan mengubah posisi sudut rotor. Perubahan sudut rotor dibatasi hingga  $90^\circ$ .  $90^\circ$  ini apabila dijadikan pu adalah 1 pu, jadi perubahan sudut rotor yang diperbolehkan adalah sebesar 1 pu hal ini diwakili oleh *overshoot* yang dialami pembangkit. Apabila terjadi perubahan lebih dari 1 pu atau  $90^\circ$  maka sistem akan terjadi lepas sinkron sehingga pembangkit berhenti beroperasi.

Hasil grafik respon perubahan sudut rotor akibat penambahan beban sebesar 0,05 pu di detik ketiga, pada pembangkit Suralaya, Muaratawar, serta Cirata ditunjukkan pada Gambar 4.1– 4.10.

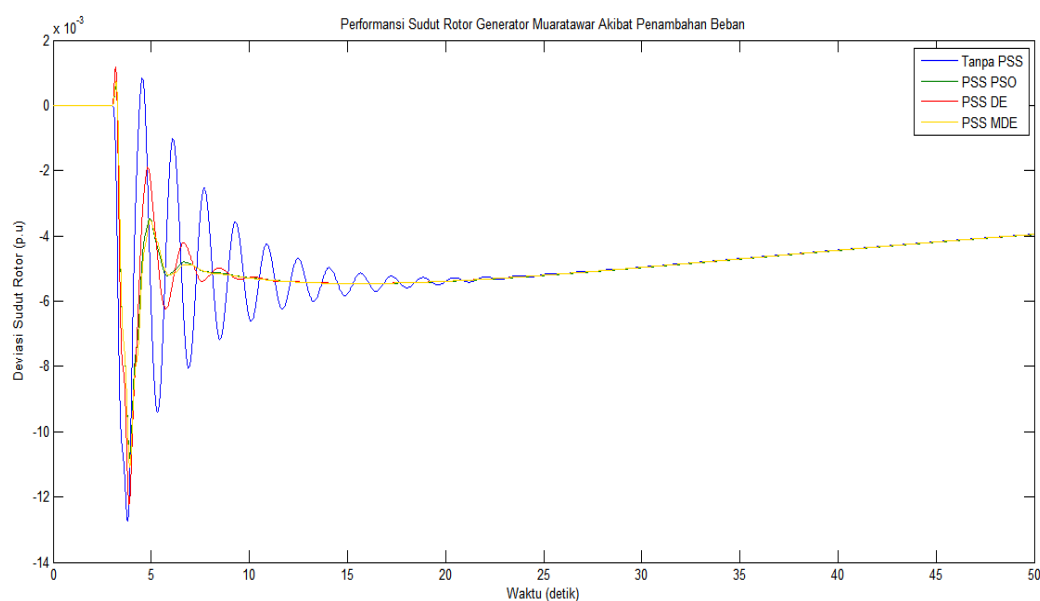


Gambar 4.1 Respon Sudut Rotor Pembangkit Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu

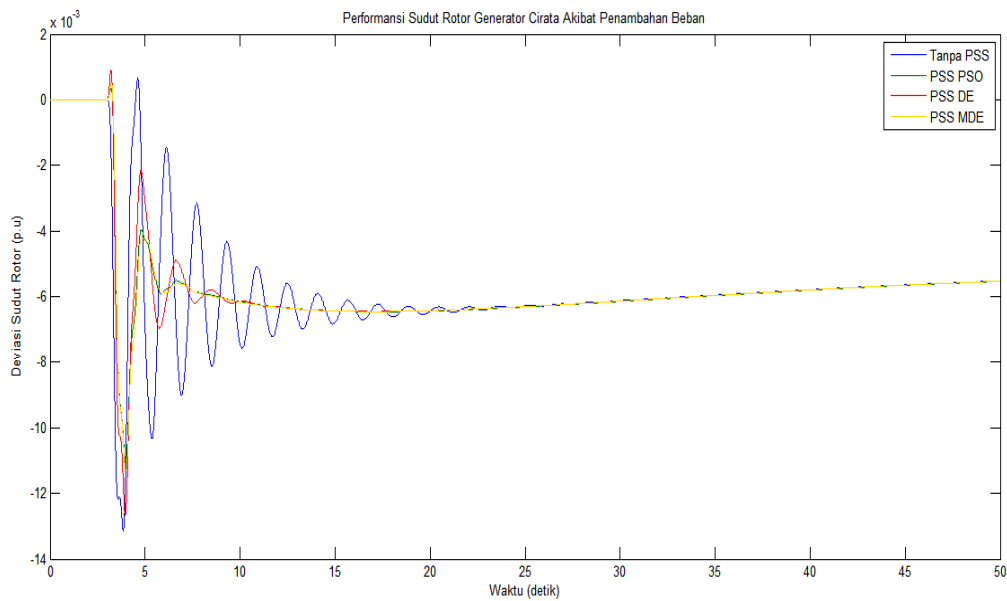
Perubahan beban yang berupa penambahan beban sebesar 0,05 pu pada pembangkit Suralaya, menyebabkan turunnya daya mekanik pembangkit. Turunnya daya mekanik pembangkit ini membuat lebih besarnya daya elektrik pembangkit dibandingkan dengan daya mekaniknya yang idealnya adalah daya mekanik sama dengan daya elektrik. Dengan naiknya daya maka terjadilah

pengereman dari rotor yang mengubah sudut rotor. Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa perubahan sudut rotor dengan menggunakan PSS MDE yang diletakkan di pembangkit Suralaya memiliki performansi paling baik dibandingkan dengan sistem tanpa PSS, sistem dengan penambahan PSS PSO dan dengan penambahan sistem PSS DE.

Penambahan beban pada pembangkit Suralaya juga mempengaruhi perubahan sudut rotor pada pembangkit Muaratawar. Pada pembangkit Muaratawar juga mengalami pengereman akibat penambahan beban di pembangkit Suralaya. Terlihat pada Gambar 4.2, respon terbaik perubahan sudut rotor pembangkit Muaratawar ketika diberi PSS yang diletakkan di pembangkit Suralaya yang dioptimisasi menggunakan MDE. Sistem yang menggunakan PSS yang dioptimisasi dengan MDE dan dengan PSO terlihat memiliki osilasi yang paling sedikit jika dibandingkan dengan sistem tanpa PSS atau dengan sistem yang menggunakan PSS hasil optimisasi dengan DE.



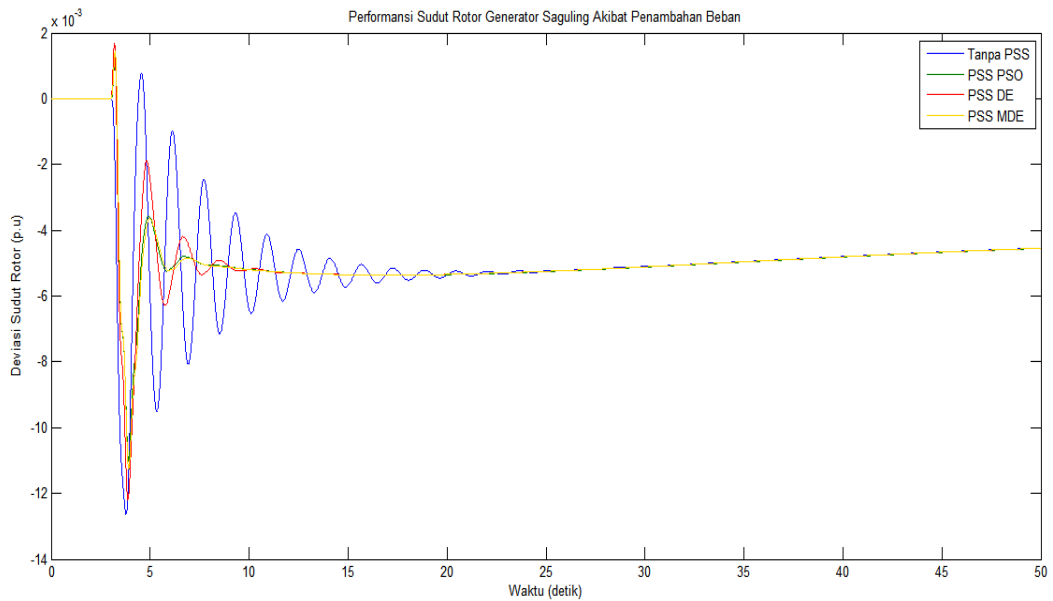
Gambar 4.2 Respon Sudut Rotor Pembangkit Muaratawar pada Perubahan Beban 0,05 pu



Gambar 4.3 Respon Sudut Rotor Pembangkit Cirata pada Perubahan Beban 0,05 pu

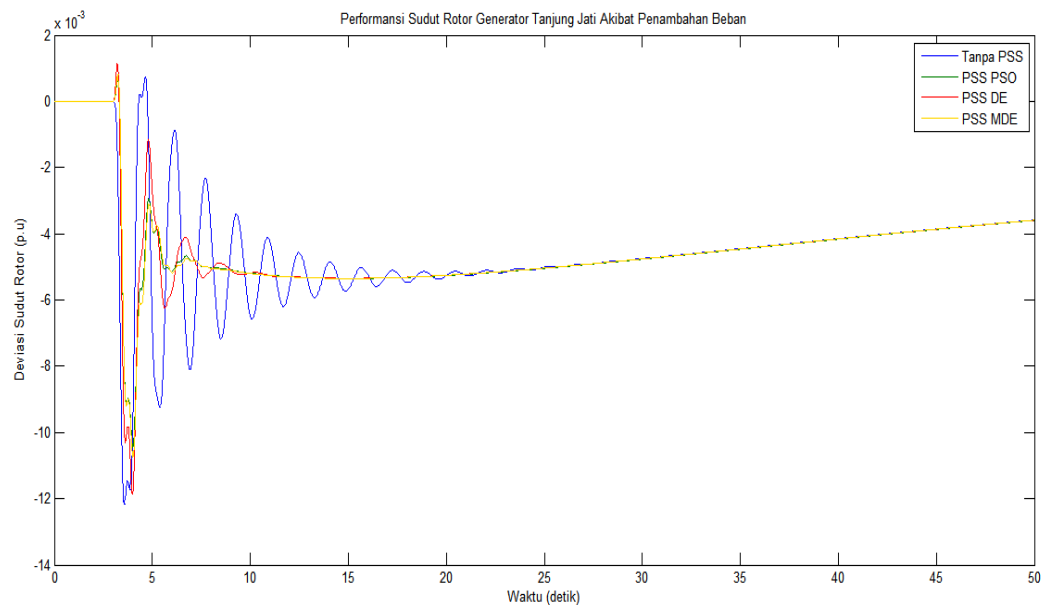
Pada Gambar 4.3 juga terlihat bahwa dengan penambahan beban pada pembangkit Suralaya perubahan sudut rotor pada pembangkit pembangkit Saguling juga mengalami perubahan akibat perlambatan yang dialami oleh pembangkit Saguling.. Terlihat pada Gambar 4.3, respon terbaik sudut rotor pembangkit Saguling adalah ketika sistem diberi PSS yang penembatannya berada di pembangkit Suralaya yang dioptimisasi menggunakan MDE. Sistem yang menggunakan PSS yang dioptimisasi dengan MDE dan dengan PSO terlihat memiliki osilasi yang paling sedikit jika dibandingkan dengan sistem tanpa PSS atau dengan sistem yang menggunakan PSS hasil optimisasi dengan DE.

Gambar 4.4 merupakan respon perubahan sudut rotor pada pembangkit Saguling akibat penambahan beban yang terjadi di pembangkit Suralaya. Penambahan ini mengakibatkan perlambatan, sehingga sudut rotor mengalami perubahan. Terlihat pada Gambar 4.4 performansi terbaik terjadi pada sistem dengan PSS yang parameternya dioptimisasi dengan menggunakan MDE dan PSO.

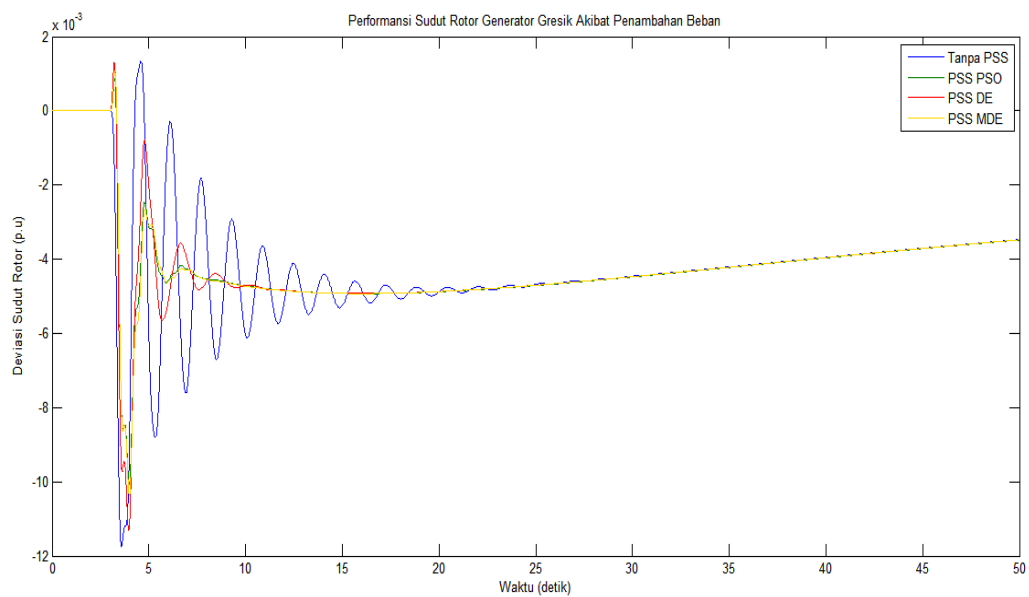


Gambar 4.4 Respon Sudut Rotor Pembangkit Saguling pada Perubahan Beban 0,05 pu

Penambahan beban yang diberikan pada pembangkit Suralaya juga mengakibatkan perubahan sudut rotor pada pembangkit Tanjung Jati. Terlihat pada Gambar 4.5 performansi terbaik ditunjukkan oleh sistem yang menggunakan MDE dan PSO sebagai optimisasi parameter PSS. Terlihat pula sistem dengan menggunakan PSS MDE dan PSS PSO memiliki gelombang yang lebih sedikit dibandingkan dengan sistem tanpa PSS dan sistem PSS DE.

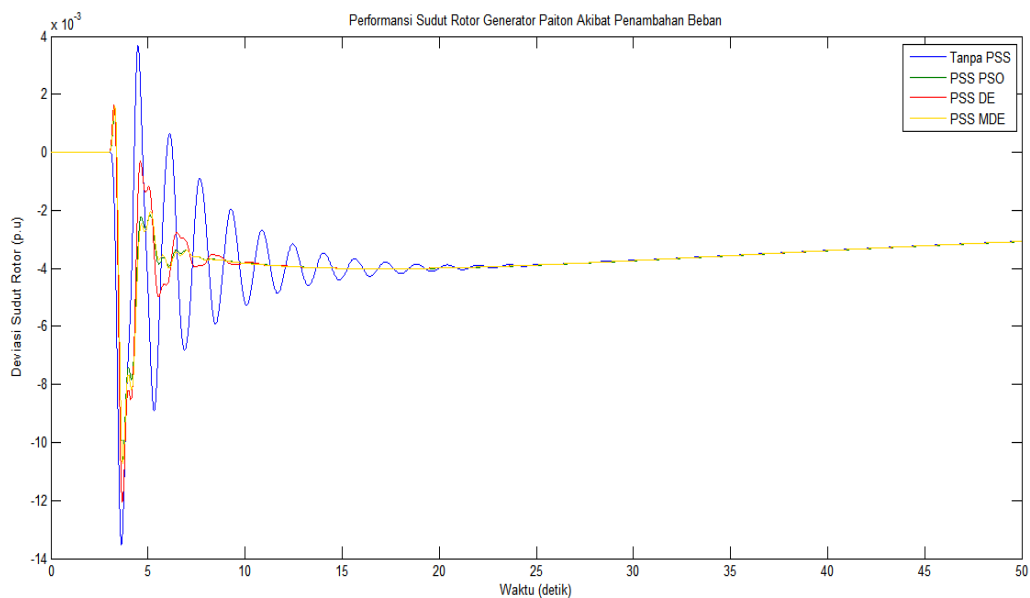


Gambar 4.5 Respon sudut rotor pembangkit Tanjung Jati pada perubahan beban 0,05 pu



Gambar 4.6 Respon Sudut Rotor Pembangkit Gresik pada Perubahan Beban 0,05 pu

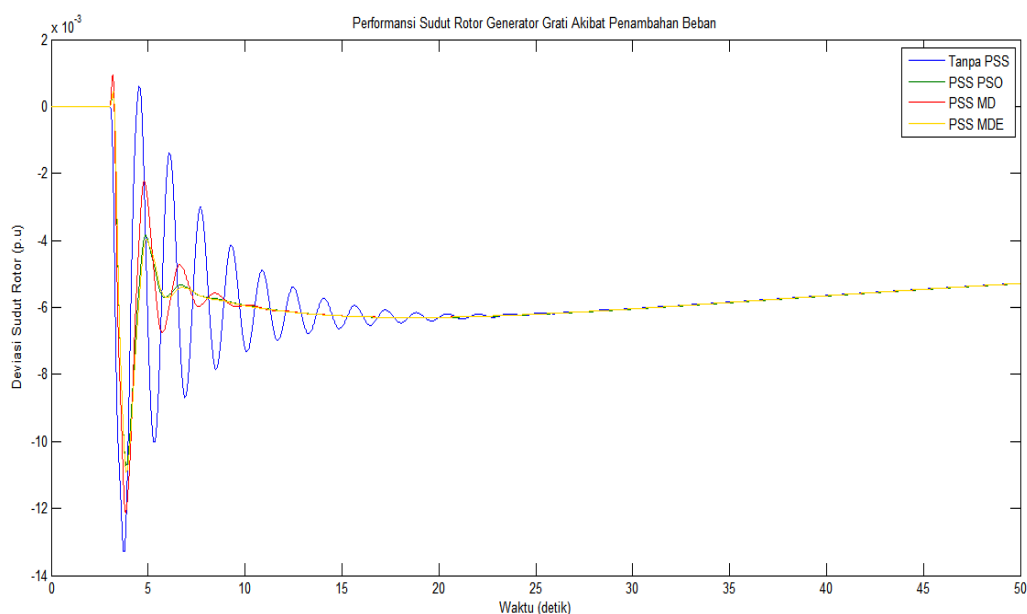
Gambar 4.6 merupakan respon perubahan sudut rotor pembangkit Gresik akibat adanya perubahan beban padan pembangkit Suralaya yang berupa penambahan beban 0,05 pu. Terlihat pada gambar bahwa dengan penambahan PSS sistem menjadi lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa PSS, hal ini dikarenakan sistem tanpa PSS memiliki settling time yang lebih lama dibandingkan dengan sistem yang diberi PSS dipasang pada pembangkit Suralaya.



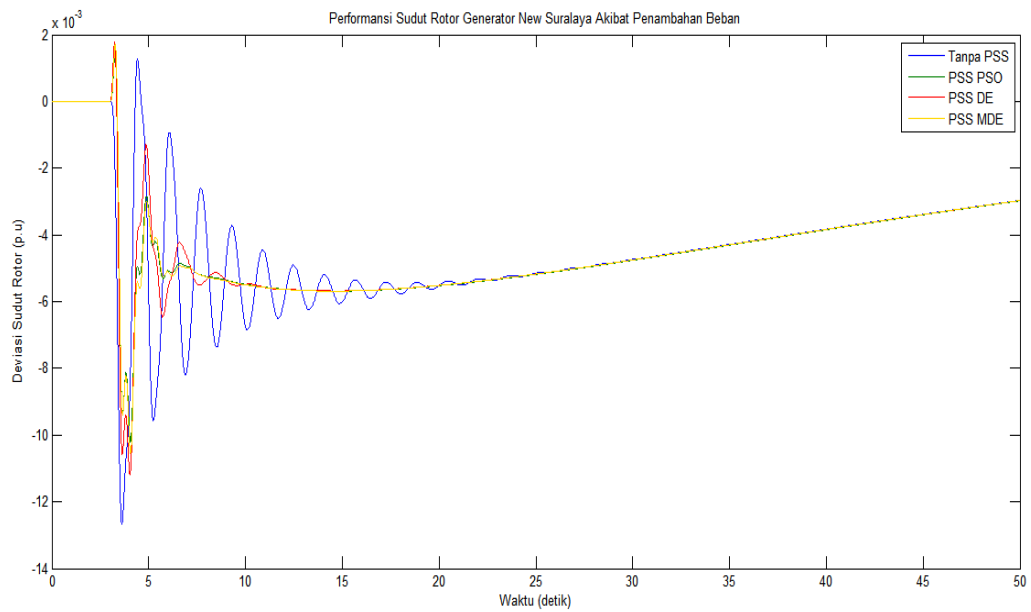
Gambar 4.7 Respon Sudut Rotor Pembangkit Paiton pada Perubahan Beban 0,05 pu

Pada Gambar 4.7 ditunjukkan bahwa ketika terjadi penambahan beban pada pembangkit Suralaya sebesar 0,05 pu respon sudut rotor pembangkit Paiton mengalami perubahan, karena sistem yang saling terinterkoneksi maka pengeraman juga dilakukan oleh pembangkit Paiton. Respon sistem terbaik pada Gambar 4.7 adalah ketika sistem diberi PSS yang dioptimisasi menggunakan MDE.

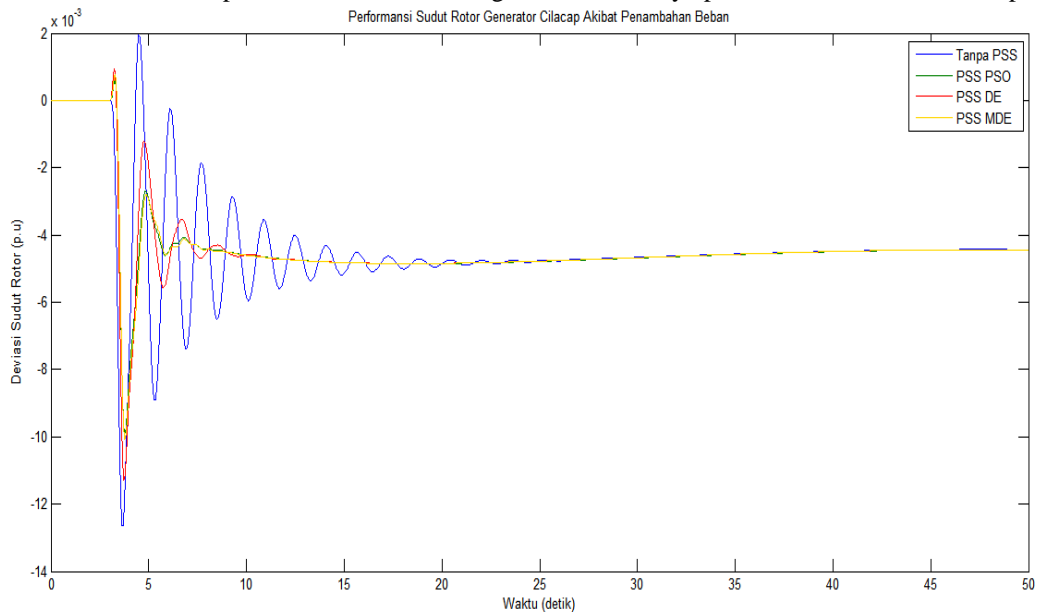
Pada Gambar 4.8, 4.9, 4.10 penambahan beban sebesar 0,05 pu yang terjadi pada pembangkit Suralaya juga mengakibatkan pembangkit Grati, New Suralaya, dan pembangkit Cilacap mengalami perubahan sudut rotor pembangkit hal ini disebabkan karena sistem terinterkoneksi. Terlihat pada Gambar 4.8 sampai dengan 4.10 pada sistem yang terinterkoneksi perubahan yang terjadi pada satu pembangkit akan mempengaruhi pembangkit lainnya. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sistem yang diberi PSS yang parameternya dioptimisasi dengan MDE memiliki performansi yang baik dibandingkan dengan sistem tanpa PSS, sistem yang menggunakan PSO untuk mengoptimisasi parameter PSS serta sistem yang menggunakan DE untuk mengoptimisasi parameter PSS.



Gambar 4.8 Respon Sudut Rotor Pembangkit Grati pada Perubahan Beban 0,05 pu



Gambar 4.9 Respon Sudut Rotor Pembangkit New Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu



Gambar 4.10 Respon Sudut Rotor Pembangkit Cilacap pada Perubahan Beban 0,05 pu

#### 4.2.2. Respon Perubahan Kecepatan Rotor Tiap Pembangkit

Ketika terjadi penambahan beban pada pembangkit Suralaya, pembangkit-pembangkit lainnya yang terinterkoneksi dengan pembangkit Suralaya mengalami perlambatan sehingga mengalami penurunan kecepatan rotor. Perubahan kecepatan rotor ini mempengaruhi perubahan frekuensi, dengan kata lain perubahan beban dapat menyebabkan osilasi frekuensi pada sistem. Penambahan



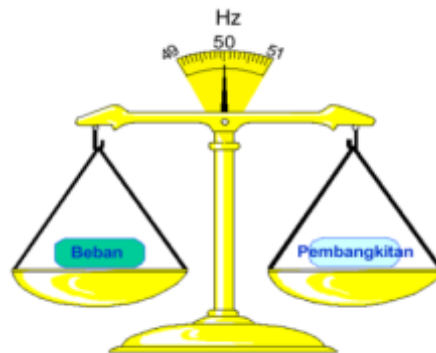
beban ini mengakibatkan daya mekanik lebih kecil dari pada daya elektrik. Perubahan daya mekanik dan daya elektrik sebanding dengan perubahan torsi mekanik dan torsi elektrik. Berdasarkan hubungan torsi dengan frekuensi adalah:

$$T_m - T_e = \Delta T < 0, \quad \text{maka} \quad \frac{d\omega}{dt} < 0 \rightarrow \text{frekuensi turun}$$

$$T_m - T_e = \Delta T > 0, \quad \text{maka} \quad \frac{d\omega}{dt} > 0 \rightarrow \text{frekuensi naik}$$

Untuk menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban dapat digambarkan sebagai berikut :

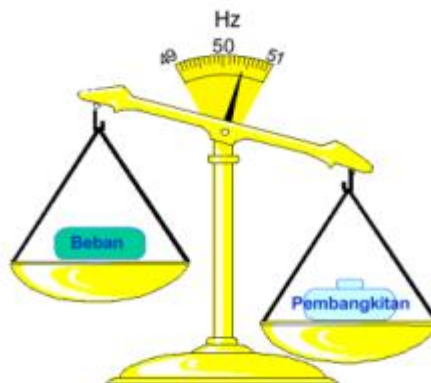
#### 1. Kondisi Pertama



Gambar 4.11 Terjadi Keseimbangan antara Pembangkitan dan Beban

Gambar 4.11 menunjukkan keseimbangan sesaat antara daya nyata (MW) pembangkitan dengan daya nyata (MW) dikonsumsi beban. Frekuensi sistem bernilai nominal (= 50 Hz), pada saat daya nyata pembangkitan sama dengan daya nyata konsumsi beban.

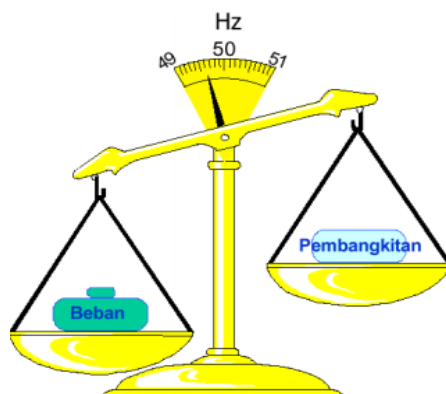
#### 2. Kondisi Kedua



Gambar 4.12 Daya Pembangkitan Lebih Besar daripada Daya Beban

Gambar 4.12 frekuensi bernilai nominal diatas 50 Hz, pada saat daya nyata pembangkitan lebih besar dari daya nyata konsumsi beban. Untuk mengembalikan frekuensi sistem ke 50 Hz, daya nyata pembangkitan dikurangi.

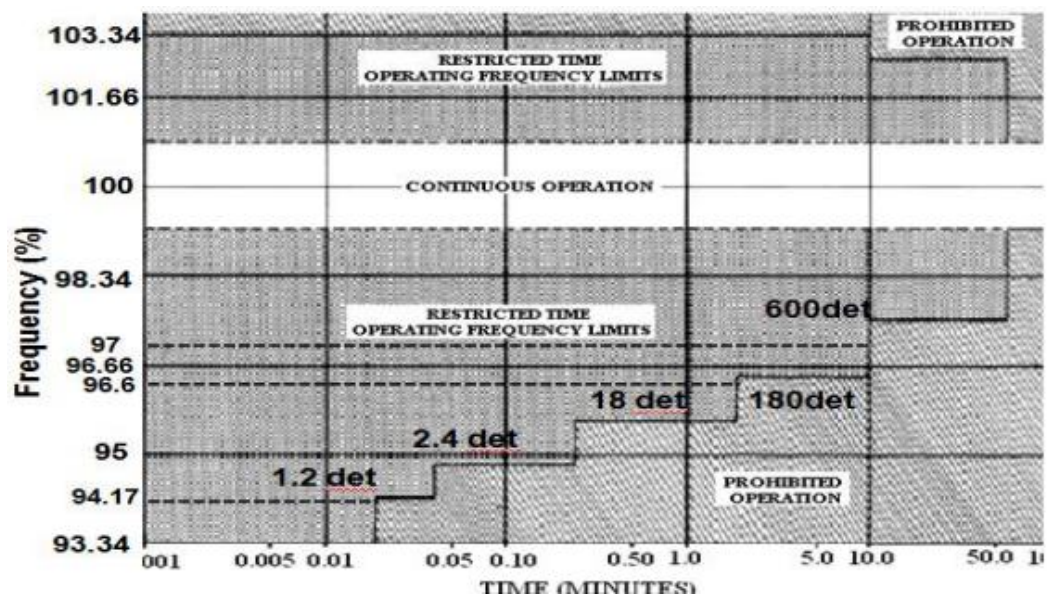
### 3. Kondisi Ketiga



Gambar 4.13 Daya Pembangkitan Lebih Kecil daripada Daya Beban

Gambar 4.13 frekuensi bernilai nominal dibawah 50 Hz, pada saat daya nyata pembangkitan lebih kecil dari daya nyata konsumsi beban. Untuk mengembalikan frekuensi sistem ke 50 Hz, daya nyata pembangkitan ditambah.

Beban sistem yang berupa daya aktif maupun daya reaktif selalu berubah sepanjang waktu, maka untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, penyediaan/pembangkitan daya aktif dalam system harus diseuaikan dengan beban daya aktif. Standar batas frekuensi kerja pembangkit ANSI/IEEE C37.106-1987 ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.14 Standar Batas Frekuensi Kerja Pembangkit ANSI/IEEE C37.106-1987

Terlihat pada Gambar 4.14 batas bawah dari nilai frekuensi adalah 93.34% dari nilai frekuensi sistem dengan selang waktu dengan selang waktu 1,2 detik, sedangkan batas atas dari frekuensi adalah 101,66% dengan selang waktu selama 600 detik.

Pada Tabel 4.4 dan 4.5 dapat dilihat perbandingan respon kecepatan rotor yang lebih jelas antara sistem tanpa PSS, PSS PSO, PSS DE dan PSS MDE

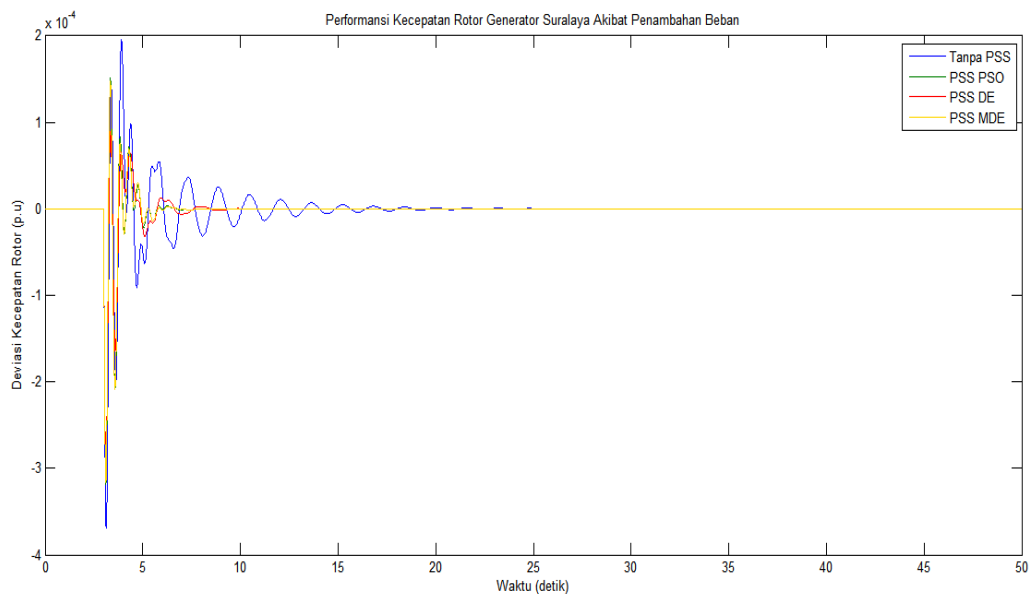
Tabel 4.4 Perbandingan Respon *Overshoot* Kecepatan Rotor

	Tanpa PSS	PSS PSO	PSS DE	PSS MDE
Pembangkit	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Overshoot</i> (pu)
Suralaya	$-3,7 \times 10^{-4}$	$-3,2 \times 10^{-4}$	$-3,15 \times 10^{-4}$	$-3 \times 10^{-4}$
Muaratawar	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-1,1 \times 10^{-4}$	$-1,4 \times 10^{-4}$	$-1,1 \times 10^{-4}$
Cirata	$-1,6 \times 10^{-4}$	$-1,1 \times 10^{-4}$	$-1,6 \times 10^{-4}$	$-1,1 \times 10^{-4}$
Saguling	$-1,2 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-1,5 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^{-4}$
Tanjung Jati	$-1,4 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-1,5 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^{-4}$
Gresik	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-1,5 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^{-4}$
Paiton	$-1,4 \times 10^{-4}$	$-1,51 \times 10^{-4}$	$-1,7 \times 10^{-4}$	$-1,5 \times 10^{-4}$
Grati	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-0,9 \times 10^{-4}$	$-1,25 \times 10^{-4}$	$-0,9 \times 10^{-4}$
New Suralaya	$-1,35 \times 10^{-4}$	$-1,5 \times 10^{-4}$	$-1,67 \times 10^{-4}$	$-1,5 \times 10^{-4}$
Cilacap	$-1,25 \times 10^{-4}$	$-1,15 \times 10^{-4}$	$-1,35 \times 10^{-4}$	$-1,15 \times 10^{-4}$

Tabel 4.5 Perbandingan Respon *Setling Time* Kecepatan Rotor

Pembangkit	Tanpa PSS	PSS PSO	PSS DE	PSS MDE
	Setling Time (s)	Setling Time (s)	Setling Time (s)	Setling Time (s)
Suralaya	>25	9	13	6
Muaratawar	>25	9	13,5	7
Cirata	>25	11	13	9
Saguling	>25	10	13	6
Tanjung Jati	>25	10	11	9
Gresik	>25	10	11	7
Paiton	>25	9	11	9
Grati	>25	10	11	6
New Suralaya	>25	10	11	7
Cilacap	>25	10	11	10

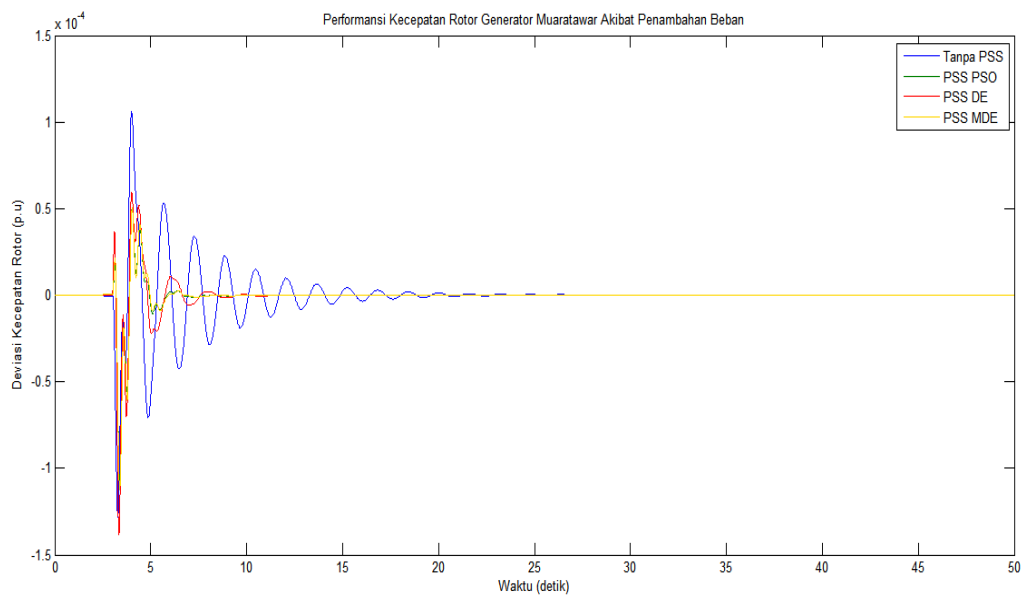
Perubahan beban yang ditandai dengan penambahan beban sebesar 0,05 pu pada pembangkit Suralaya menyebabkan perubahan frekuensi pada semua wilayah pembangkit. Perubahan frekuensi sistem ini ditandai dengan adanya perubahan kecepatan rotor yang terjadi pada pembangkit. Hasil respon perubahan Kecepatan Rotor akibat penambahan beban sebesar 0,05 pu di detik ketiga, pada tiap pembangkit ditunjukkan pada Gambar 4.15 – 4.25.



Gambar 4.15 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu

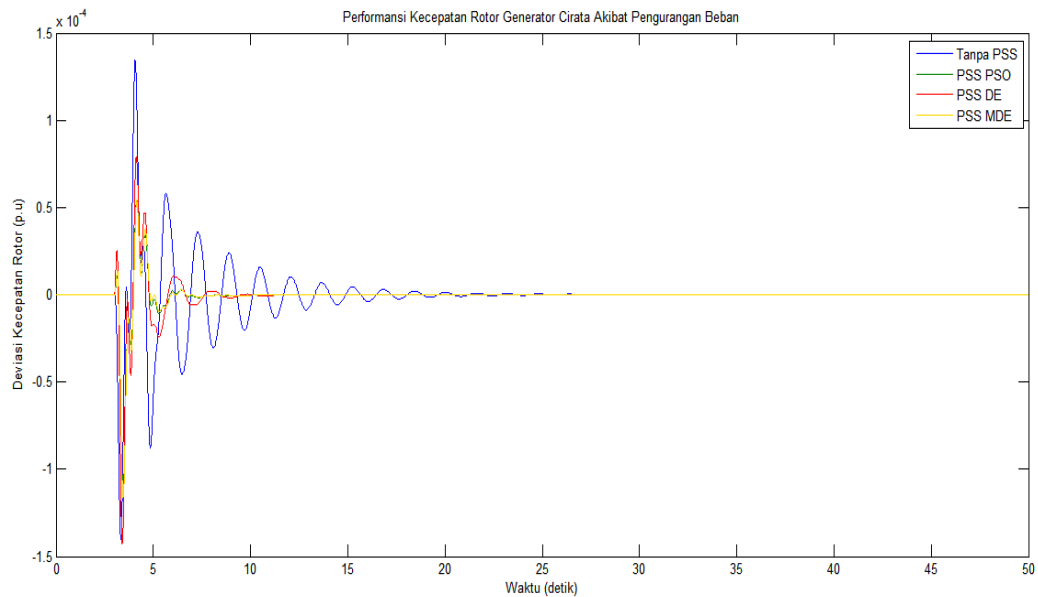
Perubahan beban pada pembangkit Suralaya mengakibatkan terjadi perubahan kecepatan rotor, perubahan kecepatan rotor ini menggambarkan osilasi frekuensi. Pada pembangkit Suralaya memiliki *overshoot* terbesar dibanding dengan pembangkit lain, hal ini disebabkan karena penambahan beban (gangguan) hanya berada pada pembangkit Suralaya. Pada Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa pembangkit Suralaya tanpa pemasangan PSS memiliki *overshoot* yang tinggi, kemudian saat diberi PSS yang di optimisasi dengan MDE, *overshoot* yang terjadi berkurang Begitu pula pada *settling time* pembangkit Suralaya yang diberi PSS yang dioptimisasi menggunakan MDE memiliki *settling time* tercepat dibandingkan dengan sistem yang lainnya.

Ketika terjadi gangguan pada pembangkit Suralaya, pembangkit Muaratawar juga merasakan gangguan. Hal ini disebabkan karena pembangkit satu dengan yang lain saling terinterkoneksi. Gambar 4.16 menunjukkan respon frekuensi pada pembangkit Muaratawar yang diwakili dengan grafik respon perubahan kecepatan rotor pada pembangkit Muaratawar, dapat dilihat respon frekuensi pada sistem sebelum diberi PSS memiliki *overshoot* yang paling tinggi dan memiliki *settling time* terlama. Setelah diberi PSS yang dioptimisasi parameternya nilai *overshoot* mengecil dan mempercepat *settling time*.

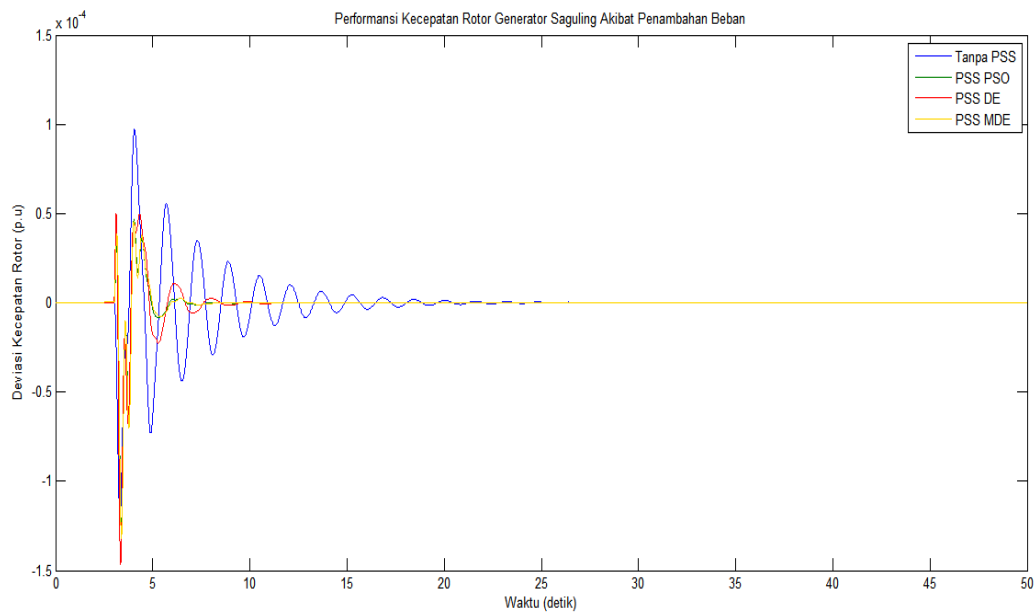


Gambar 4.16 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Muaratawar pada Perubahan Beban 0,05 Pu

Gambar 4.17 menunjukkan respon frekuensi pada pembangkit Cirata saat yang diwakilkan dengan perubahan kecepatan rotor, ketika terjadi gangguan pada pembangkit Suralaya. Pada saat pembangkit tanpa PSS didapatkan nilai *overshoot* yang tinggi dibandingkan dengan sistem yang diberi PSS. Sistem dengan PSS MDE memiliki performa yang baik, hal ini dibuktikan dengan kecilnya nilai *overshoot* dan *settling time* sistem cepat.



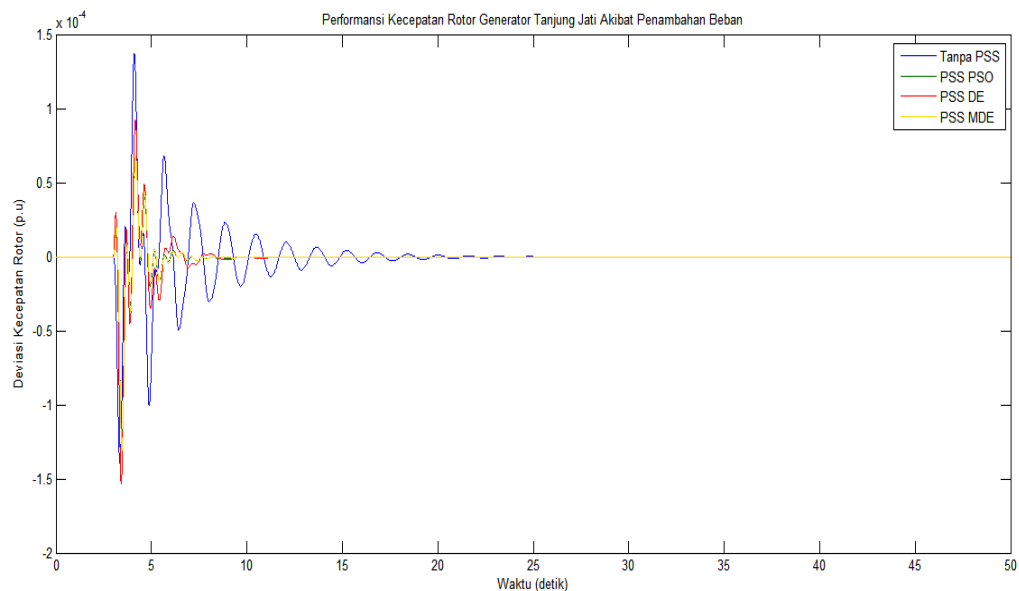
Gambar 4.17 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Cirata pada Perubahan Beban 0,05 Pu



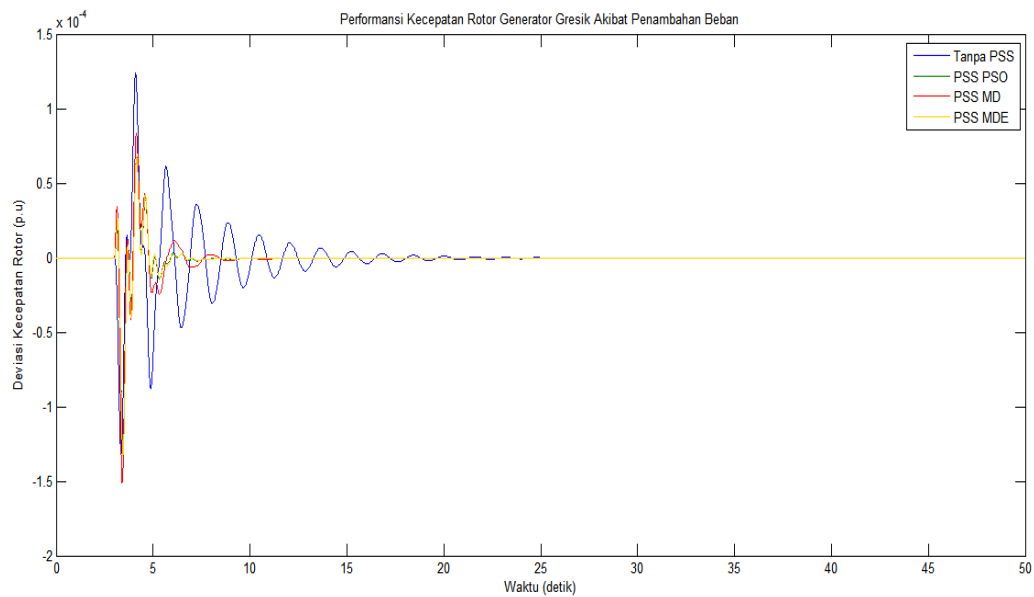
Gambar 4.18 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Saguling pada Perubahan Beban 0,05 Pu

Saat terjadi penambahan beban pada pembangkit Suralaya mempengaruhi kecepatan rotor pembangkit Saguling. Kecepatan rotor pembangkit Saguling mengalami perlambatan sehingga mengakibatkan terjadinya osilasi frekuensi pada pembangkit Saguling, hal ini terlihat pada Gambar 4.18. Pada sistem tanpa PSS terjadi banyak osilasi sehingga memiliki nilai *settling time* yang lama dibandingkan dengan sistem dengan PSS selain itu, pembangkit tanpa PSS memiliki nilai *overshoot* yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan PSS.

Sistem dengan PSS yang dioptimisasi menggunakan MDE memiliki performansi terbaik dibandingkan dengan sistem dengan PSS yang dioptimisasi menggunakan DE maupun PSO, hal ini terlihat pada Gambar 4.19 dan 4.20. respon kecepatan rotor pembangkit Tanjung Jati dan pembangkit Grati mengalami perbaikan ketika terjadi penambahan beban pada pembangkit Suralaya yang sebesar 0,05 pu. Kecepatan rotor pembangkit Tanjung Jati dan pembangkit Gresik mengalami osilasi dikarenakan terinterkoneksinya pembangkit Tanjung Jati dan Gresik dengan pembangkit Suralaya.



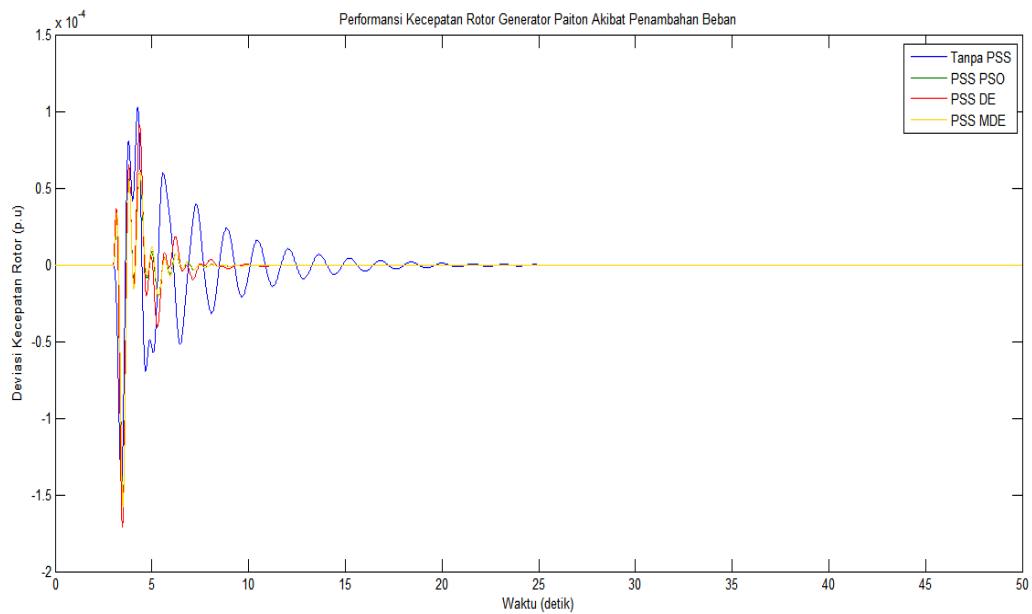
Gambar 4.19 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Tanjung Jati pada Perubahan Beban 0,05 Pu



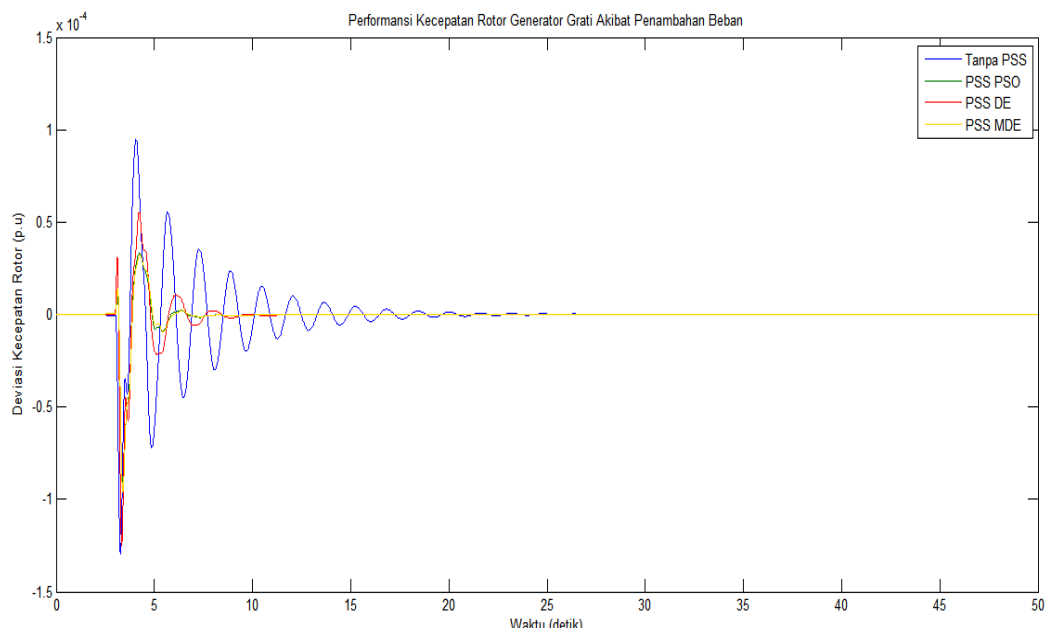
Gambar 4.20 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Gresik pada Perubahan Beban 0,05 Pu

Gambar 4.21 dan 4.22 merupakan perubahan kecepatan rotor pada pembangkit Paiton dan pembangkit Grati. Perubahan kecepatan pada pembangkit tersebut dikarenakan adanya penambahan beban yang terjadi pada pembangkit Suralaya. Dengan adanya penambahan beban pada pembangkit Suralaya, kecepatan rotor pada pembangkit Paiton dan pembangkit Grati mengalami perlambatan karena terdapat perbedaan antara daya mekanik dengan daya elektrik generator. perlambatan ini ditunjukkan dengan respon kecepatan rotor pada saat tanpa PSS yang menuju kebawah yang selanjutnya kembali ke kecepatan rotor semula yakni 0. Pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 sistem tanpa PSS memerlukan waktu yang lama untuk kembali ke titik semula yakni 0 dibandingkan dengan sistem yang dioptimisasi menggunakan PSO, DE, maupun MDE. Dari ketiga metode optimisasi waktu tercepat diraih oleh PSS yang dioptimisasi menggunakan MDE.





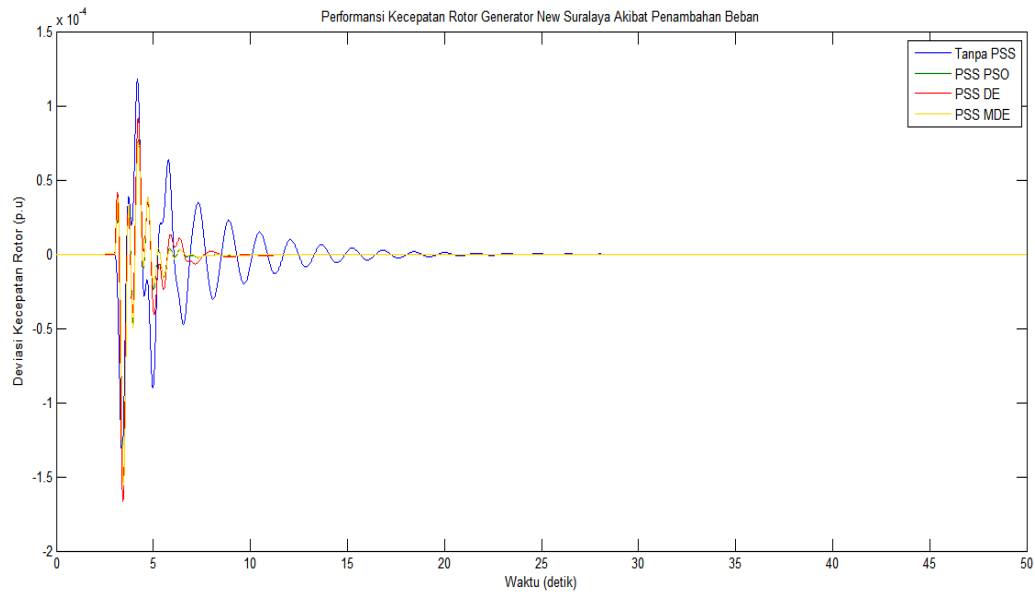
Gambar 4.21 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Paiton pada Perubahan Beban 0,05 Pu



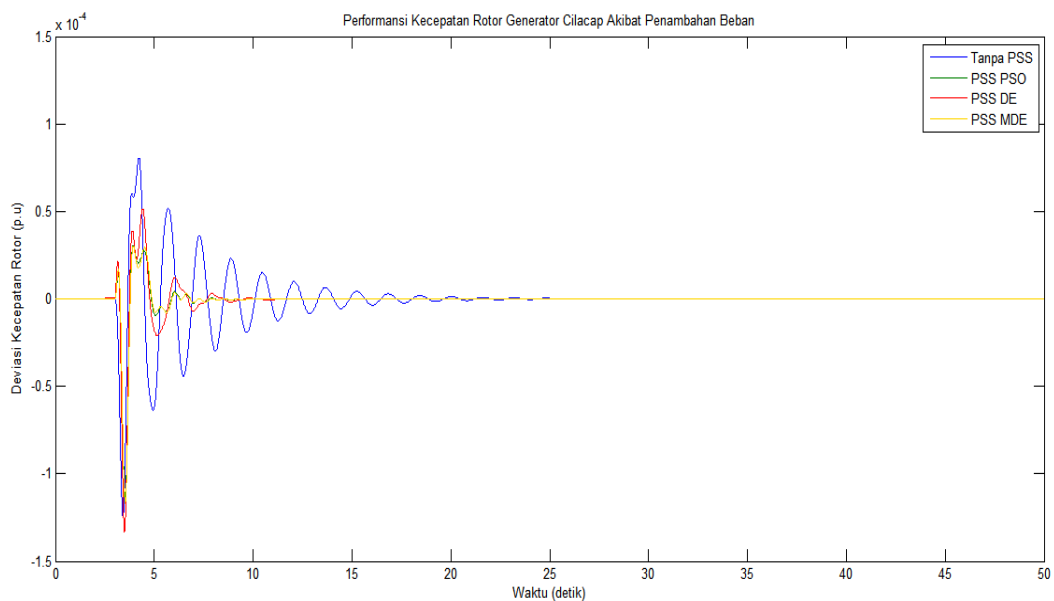
Gambar 4.22 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Grati pada Perubahan Beban 0,05 Pu

Gambar 4.23 dan Gambar 4.24 memperlihatkan bahwa ketika terjadi penambahan beban pada pembangkit Suralaya yang sebesar 0,05 pu, pembangkit New Suralaya dengan pembangkit Cilacap juga mengalami perlambatan. Perlambatan ini mengakibatkan osilasi yang terjadi pada frekuensi sistem pembangkit New Suralay dan pembangkit Cilacap. Pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24, sistem dapat kembali ke nilai semula yang paling cepat adalah

pada sistem dengan menggunakan PSS MDE. Dengan PSS MDE pula *overshoot* dapat teredam dengan baik.



Gambar 4.23 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit New Suralaya pada Perubahan Beban 0,05 pu



Gambar 4.24 Respon Kecepatan Rotor Pembangkit Cilacap pada Perubahan Beban 0,05 Pu

Dari gambar 4.1–4.10 dan Gambar 4.15-4.24 dapat terlihat perbedaan sudut rotor dan respon kecepatan rotor pada masing-masing pembangkit setelah diberi gangguan(penambahan beban sebesar 0,05 pu) pada pembangkit Suralaya. Pada Gambar 4.1 terlihat pembangkit Suralaya mengalami osilasi setelah diberi

gangguan sebesar 0.05 pu. Terlihat pula perbedaan overshoot dan settling time pada sistem tanpa PSS, PSS yang ditala dengan menggunakan PSO, PSS yang ditala dengan menggunakan DE, dan PSS yang ditala dengan menggunakan MDE. Sehingga pemasangan PSS pada pembangkit Suralaya dapat meredam *overshoot* serta mempercepat *settling time*. PSS yang di optimisasi dengan MDE memiliki performansi yang lebih bagus dibandingkan dengan PSS yang dioptimisasi menggunakan PSO maupun DE. Pemasangan PSS pada satu pembangkit dapat mempengaruhi pembangkit yang lain dikarenakan semua pembangkit terhubung secara interkoneksi, hal ini dapat terlihat pada pembangkit Muaratawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik, Paiton, Grati, New Suralaya, dan Cilacap dengan pemasangan PSS *overshoot* mampu diredam serta *settling time* yang lebih cepat. Dari table 4.2 sampai dengan tabel 4.5 terlihat bahwa PSS MDE memiliki *settling time* yang paling cepat. Namun tidak di semua pembangkit memiliki nilai *overshoot* yang paling kecil.

Perubahan beban yang terjadi pada pembangkit Suralaya sebesar 0.05 pu (penambahan beban) menyebabkan  $P_e > P_m$  sehingga respon kecepatan pembangkit adalah kebawah. Dari gambar hasil simulasi menunjukkan respon kecepatan rotor setelah diberi gangguan pada pembangkit Suralaya dan dapat dilihat besar osilasi *overshoot* pada pembangkit berkurang setelah dipasang PSS, selain itu settling time yang dihasilkan juga semakin cepat untuk menuju steady state dengan metode yang diusulkan yaitu MDE dibandingkan dengan metode sistem tanpa kontrol (tanpa PSS). Dari hasil simulasi menunjukkan performansi kinerja yang meningkat dengan pemasangan PSS.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan:

1. Gangguan pada satu pembangkit dapat berpengaruh pada pembangkit lain apabila pembangkit itu saling terinterkoneksi.
2. MDE dapat digunakan untuk mengoptimisasi nilai parameter PSS. Dari optimisasi didapatkan nilai  $K_{pss}$  sebesar 200, nilai  $T_w$  sebesar 4,98,  $T_1$  sebesar 6,11,  $T_2$  sebesar 0,1,  $T_3$  sebesar 6,3, dan  $T_4$  sebesar 0,1.
3. Dengan pemasangan PSS sebagai kontrol generator yang optimal dapat menambah performansi peredaman osilasi frekuensi sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV. Kecepatan rotor yang menunjukkan perubahan frekuensi pada sistem membaik ketika sistem dipasang PSS.
4. Penerapan PSS dengan menggunakan metode MDE dapat memperbaiki kestabilan sistem walaupun tidak dipasang pada semua pembangkit. Penerapan PSS pada pembangkit Suralaya mampu meredam *overshoot* dan mempercepat *settling time*. Seperti pada kecepatan rotor pembangkit Suralaya *overshoot* dapat teredam menjadi  $-3 \times 10^{-4}$  pu dan mempercepat *settling time* menjadi 6 detik.

#### **5.2 Saran**

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Penentuan iterasi bisa lebih dari 500 agar mendapatkan nilai konvergensi yang lebih baik.
2. Penentuan waktu untuk melihat performansi respon perubahan sudut rotor bisa lebih dari 50 agar mendapatkan nilai yang lebih stabil lagi.
3. Penerapan PSS bisa digunakan dalam gangguan sistem dengan metode *Computational Intelligence* yang baru.

4. Sistem dapat dilakukan penambahan peralatan kontrol yang lain seperti STATCOM, UPFC, TCSC, FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission system*), SVC (*Static var compensation*) atau peralatan *energy storage* SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kundur, Prabha., "Power System Stability and Control," McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] Ali, E. S., "*Optimization of Power System Stabilizer Using BAT Search Algorithm,*" International Journal of Electrical Power and Energy System, vol. 61, pp.683-690, 2014.
- [3] Ma, J., Wang, H. J., & Lo, K. L., "*Clarification on Power System Stabiliser Design,*" IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 7, Iss. 9, pp. 973-981, 2013
- [4] Chitara, D., Swarnkar, A., Gupta, N., Niazi, K. R., & Bansal, R. C., "*Optimal Tuning of Multimachine Power System Stabilizer Using Cuckoo Search Algorithm,*" IFAC-Papers OnLine 48-30, pp. 143-148, 2015.
- [5] Adjeround, F. M., Djahli, F., Mayouf, A., & Devers, T., "*A Coordinated Genetic Based Type-2 Fuzzy Stabilizer for Conventional and Superconducting Generators,*" In Electric Power System Research 129, pp. 51-61, 2015.
- [6] Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas, "Mati Listrik Jawa-Bali 2005," [https://id.wikipedia.org/wiki/Mati\\_listrik\\_Jawa-Bali\\_2005](https://id.wikipedia.org/wiki/Mati_listrik_Jawa-Bali_2005).
- [7] Soliman, H., & Shafiq, M., "*Robust stabilisation of power systems with Random Abrupt Changes,*" IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 9, Iss. 15, pp.2159-2166, 2015
- [8] Elazim, S. A., & Ali, E., "*Optimal Power System Stabilizers design via Cuckoo Search algorithm,*" In Electric Power System Research 75, pp. 99-107, 2016.
- [9] Rogers, G. J., "*The Application of Power System Stabilizers to a Multigenerator Plant,*" IEEE Transaction on Power System, vol. 15 no. 1, pp. 350-355, 2000.

- [10] Rafiee, Z., Ganjefar, S., & Meyabadi, A. F., "*A New PSS Tuning Technique Using ICA and PSO Methods with the Fourier Transform,*" Electrical and Electronic Engineering, pp. 17-23, 2011.
- [11] Abido, M. A., "Computational Intelligence in Power Engineering-Robust Design of Power System Stabilizers for Multimachine Power Systems Using Differential Evolution," Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-18, 2010.
- [12] Sun, Z., Wang, N., Srinivasan, D., & Bi, Y., "*Optimal Tuning of Type-2 Fuzzy Logic Power System Stabilizer Based On Differential Evolution Algorithm,*". In Electric Power System Research 62, pp. 19-28, 2014.
- [13] Soeprijanto, A., "Desain Kontroller untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik," ITSpress, 2012.
- [14] Aderson, P. M., & Fouad, A. A., "Power System Control and Stability," IEEE Press Power System Engineering series, 1997.
- [15] Moussa, H. A., & Yu, Y.-n., "*Dynamic Interaction Of Multi-Machine Power System And Excitation Control,*" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-93, Issue: 4, pp. 1150–1158, 1974.
- [16] Simon, D., "Evolutionary Optimization Algorithms," John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [17] Mezura-Montes, Efrén., J. u.-R., "*Modified Differential Evolution for Constrained Optimization,*" IEEE Congress on Evolutionary Computation (pp. 25-32), 2006.
- [18] Niamul Islam, Naz., et al., "*Comparative Study of Popular Objective Function for Damping Power System Oscillations in Multimachine System,*" Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal, 2014.



## NOMENCLATUR

$E$	Tegangan di belitan stator
$n$	Kecepatan putar poros generator
$\phi$	Fluksi
$C$	Konstanta pembanding
$T$	Torsi total generator
$M$	Momen inersia dari sistem generator
$a$	Percepatan putar atau turunan kuadrat dari $\theta$
$\theta$	Sudut mekanik rotor generator
$T_m$	Torsi mekanik
$T_e$	Torsi elektrik.
$\Delta\delta$	Perubahan sudut daya rotor ( $\Delta\delta$ ) akan menim
$T_s$	Torsi Sinkronisasi
$\Delta\omega$	Perubahan kecepatan rotor
$T_d$	Torsi Redaman ( $T_d$ )
$D$	Koefisien torsi redaman.
$K_1, K_{1ii}$	Variabel sinkronasi
$K_2, K_{2ii}$	Variabel efek perubahan tegangan internal generator
$K_3, K_{3ii}$	Variabel efek rangkaian medan
$K_4, K_{4ii}$	Variabel efek adanya reaksi jangkar
$K_5, K_{5ii}$	Variabel efek perubahan beban pada output generator
$K_6, K_{6ii}$	Variabel efek perubahan beban pada output generator
$\Delta\delta_j$	Sudut rotor mesin j
$E_{qj}'$	<i>Flux linkage</i> mesin j
$\Delta V_f$	Perubahan tegangan medan

$C_{3,ij}$	Variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan <i>flux linkage</i> mesin j terhadap perubahan tegangan medan mesin i
$K_{1,ij}$	Variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j terhadap perubahan tegangan medan mesin i
$K_{2,ij}$	Variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan <i>flux linkage</i> mesin j terhadap perubahan tegangan terminal mesin i.
$K_{4,ij}$	Variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j terhadap perubahan tegangan medan mesin i
$K_{5,ij}$	Variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j terhadap perubahan tegangan terminal mesin i
$K_{6,ij}$	Variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan <i>flux linkage</i> mesin j terhadap perubahan tegangan terminal mesin i.
$K_A$	Komponen eksitasi
$K_S, K_{STAB}$	Gain (penguat) PSS
$T_W, T_5$	Komponen <i>Washout</i>
$T_1 - T_4$	Komponen <i>Lead-Leg</i>
$T_R$	Komponen transduser
$Ideal PSS\omega(s)$	Nilai ideal PSS
$D_{PSS}$	Kontribusi peredaman yang diinginkan stabilizer
$GEP(s)$	Fungsi alih eksitasi
$S_P$	Sinyal frekuensi
$X_e$	Reaktansi
$X_{GEN}$	Reaktansi generator
$S_P$	Sinyal daya
$T_e$	Torsi elektrik
$P_e$	Daya aktif
$\omega_r$	Kecepatan putaran generator

$Y_{\text{BUS}}$	Matrik admitansi jaring
$Y_{\text{RED}}$	Matrik admitansi jaring reduksi
$\hat{Y}_{\text{BUS}}$	Matrik admintansi transien generator
$P_{\text{Li}}$	Daya aktif sistem
$Q_{\text{Li}}$	Daya reaktif sistem
$V_A$	Tegangan sistem
$I_A$	Arus sistem
$b_{j,U}$	<i>Upper bounds</i>
$b_{j,L}$	<i>lower bounds</i>
$v_{i,g}$	vektor mutan
$x_{r0,g}, x_{r1,g}, x_{r2,g}$	indeks mutan yang dipilih secara acak
$F$	faktor mutan
$u_{i,g+1}$	vektor uji
$rand_j$	evaluasi ke- $j$ dari pembangkitan bilangan acak
$CR$	konstanta <i>crossover</i>
$j_{\text{rand}}$	indeks yang dipilih secara acak
$x_{j,G}^{\text{best}}$	solusi terbaik dari populasi saat ini
$x_{j,G}^i$	orang tua saat ini
$x_{j,G}^{r1}, x_{j,G}^{r2}, x_{j,G}^{r3}$	populasi saat ini yang dipilih secara acak
$F_\alpha$	faktor yang mengindikasikan pengaruh solusi terbaik
$F_\beta$	faktor yang mengindikasikan pengaruh orang tua
$\zeta_i$	<i>Damping ratio</i> ke- $i$
$n$	jumlah eigenvalue

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BIODATA PENULIS



**Rohmanita Duanaputri** adalah putri kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Muharor dan Murni Astutik, S.Pd SD. Penulis biasa dipanggil dengan nama Nita. Penulis lahir di kota Probolinggo pada tanggal 11 Desember 1991. Penulis memulai pendidikannya di TK. Tunas Harapan kemudian melanjutkan studi di SDN Sukabumi II, SMP Negeri 1 Probolinggo, dan MA Negeri 3 Malang. Setelah lulus dari MAN pada tahun 2010, penulis melanjutkan studi D-III di Jurusan Teknik Elektro, program studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri

Malang, lulus pada September 2013. Setelah lulus dari D-III penulis melanjutkan studi D-IV di Jurusan Teknik Elektro, program studi Sistem Kelistrikan, Politeknik Negeri Malang dan lulus pada September 2014. Kemudian penulis melanjutkan studi S2 di Jurusan Teknik Elektro, program studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini. Penulis selama kuliah S2 menjadi member di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga atau *Power System Simulation Laboratory* (PSSL). Penulis dapat dihubungi melalui alamat email [rohmanitar@gmail.com](mailto:rohmanitar@gmail.com).

*Halaman ini sengaja dikosongkan*